

공학석사 학위논문

원자력 발전소 핵연료 재충전 기계의
내진설계에 관한 연구

**A Study for Seismic Design of Refueling Machine in Nuclear
Power Plant**


지도교수 조 종 래


2008년 2월


한국해양대학교 대학원

기계공학과 김 영 환

本 論文을 김영환의 工學碩士 學位論文으로 認准함.

위원장 공학박사 최 형 식 (인) 

위 원 공학박사 정 재 현 (인) 

위 원 공학박사 조 종 래 (인) 

2007년 12월 31일

한국해양대학교 대학원

목 차

| | |
|-----------------------------------|-----|
| Abstract | i |
| List of Tables | iii |
| List of Figures | iv |
| | |
| 1. 서론 | 1 |
| 1.1 연구 배경 | 1 |
| 1.2 연구 목적 및 내용 | 1 |
| | |
| 2. 내진평가를 위한 유한요소 해석의 이론적 배경 | 4 |
| 2.1 모드 해석 이론 | 4 |
| 2.2 응답 스펙트럼 해석 이론 | 8 |
| | |
| 3. 핵연료 취급 장치의 유한요소 모델 | 10 |
| 3.1 해석 및 설계절차 | 10 |
| 3.2 유한요소 모델링 | 11 |
| 3.2 해석 조건 | 18 |
| | |
| 4. 핵연료 취급 장치의 구조 및 내진평가 | 22 |
| 4.1 허용 응력 | 22 |
| 4.2 구조 해석 | 23 |
| 4.3 고유치 해석 | 26 |
| 4.3.1 고유진동수 분석 | 26 |
| 4.3.2 유효질량 분석 | 36 |

| | |
|------------------------------|----|
| 4.4 응답 스펙트럼 해석 | 39 |
| 4.4.1 응답 스펙트럼 | 39 |
| 4.4.2 응답 스펙트럼 해석 결과 분석 | 46 |
| 5. 볼트부와 용접부에 대한 내진평가 | 49 |
| 5.1 허용응력 | 49 |
| 5.2 볼트부 | 50 |
| 5.2.1 볼트부 해석 예제 | 54 |
| 5.3 용접부 | 57 |
| 5.3.1 용접부 해석 예제 | 60 |
| 6. 결론 | 63 |
| 참고문헌 | 64 |

A Study for Seismic Design of Refueling Machine in Nuclear Power Plant

Young-Hwan Kim

Department of Mechanical Engineering, Graduate School,
Korea Maritime University

Abstract

The analysis uses the seismic response curves (OBE, SSE) for SINKORI 3/4 that were reflected the revision to the seismic requirement of nuclear power plant. New curves contain higher amplitude than those of previous nuclear power plants in Korea. The structure was modeled using finite element techniques. Calculated stresses from finite element model are evaluated in accordance with design criteria of KEPIC MCN, 2000.

The Refueling Machine (RM) consists of two structural parts of bridge and trolley. The bridge structure is approximately 8.5 m long and 5 m wide and is primarily composed of two 700 mm deep wide flange sections spanning the reactor area at the operating level. A trolley structure is mounted on wheels that roll on the rails of the bridge structure.

The trolley supports a tubular mast which extends approximately 8.5 m below the trolley. This tube houses a movable hoist assembly which can extend an additional 5 m during operation.

The model drawing which is included as part of this report shows the finite model in detail. Geometry, element numbers and symbols are described on the model drawings. The base structures of RM are the shell for bridge, trolley, mast and hoist and the beam for hoist frame and grapple. A trolley assembly is mounted on wheels and assumed positioned at two locations of side and center on the rails of the bridge structure.

The seismic analysis utilizes the response spectrum analysis. The mode shapes and spatial components for the X, Y and Z directions were combined using the square root of the sum of the squares (SRSS) method. Closely spaced modes are combined in accordance with NRC Reg. Guide 1.92.

The natural frequencies are used by the first fifty modes in the seismic analysis of the ANSYS. It can be seen that the higher modes do not have a significant effect on the results.

The stresses in all element due to the static and seismic loads were combined and evaluated with respect to the allowable stress. The stresses of welds and bolts also are checked based on KEPIC SWS and MCN 2314.

List of Tables

| | |
|----------|--|
| Table 1 | Analysis cases |
| Table 2 | Material properties |
| Table 3 | Real constant of MASS21 |
| Table 4 | Real constant of BEAM4 |
| Table 5 | Real constant of SHELL63 |
| Table 6 | Boundary condition |
| Table 7 | Allowable stress |
| Table 8 | Maximum stress |
| Table 9 | Maximum displacement |
| Table 10 | Modal frequencies for Case A |
| Table 11 | Modal frequencies for Case B |
| Table 12 | Effective mass in the x-direction |
| Table 13 | Effective mass in the y-direction |
| Table 14 | Effective mass in the z-direction |
| Table 15 | Sum of effective masses |
| Table 16 | North-South direction reference response spectra |
| Table 17 | East-West direction reference response spectra |
| Table 18 | Vertical direction reference response spectra |
| Table 19 | Maximum stress |
| Table 20 | Maximum displacement |
| Table 21 | Unit moment of inertia |
| Table 22 | Unit polar moment of inertia |

List of Figures

- Fig. 1 Idealized model
- Fig. 2 Analysis process
- Fig. 3 Component arrangement
- Fig. 4 Modeling of refueling machine (Case B)
- Fig. 5 Mesh shape for Case A
- Fig. 6 Mesh shape for Case B
- Fig. 7 Element geometry
- Fig. 8 Position of boundary condition
- Fig. 9 Distribution of von Mises stress on operating condition for Case A
- Fig. 10 Distribution of von Mises stress on operating condition for Case B
- Fig. 11 Distribution of displacement on operating condition for Case A
- Fig. 12 Distribution of displacement on operating condition for Case B
- Fig. 13 1st mode shape at 0.616 Hz
- Fig. 14 2nd mode shape at 4.190 Hz
- Fig. 15 3rd mode shape at 4.398 Hz
- Fig. 16 4th mode shape at 11.052 Hz
- Fig. 17 5th mode shape at 12.495 Hz
- Fig. 18 6th mode shape at 14.743 Hz
- Fig. 19 1st mode shape at 0.616 Hz
- Fig. 20 2nd mode shape at 11.064 Hz
- Fig. 21 3rd mode shape at 11.399 Hz
- Fig. 22 4th mode shape at 12.207 Hz

Fig. 23 5th mode shape at 12.537 Hz

Fig. 24 6th mode shape at 14.722 Hz

Fig. 25 Effective masses

Fig. 26 North-South direction reference response spectra

Fig. 27 East-West direction reference response spectra

Fig. 28 Vertical direction reference response spectra

Fig. 29 Distribution of von Mises stress on SSE condition for Case A

Fig. 30 Distribution of von Mises stress on SSE condition for Case B

Fig. 31 Distribution of displacement on SSE condition for Case A

Fig. 32 Distribution of displacement on SSE condition for Case B

Fig. 33 Bolt position

Fig. 34 Bolt joint generating high stress at bridge

Fig. 35 Bolt joint at guide roller ass'y

Fig. 36 Weld shape

Fig. 37 Weld joint generating high stress at trolley

Fig. 38 Weld shape

1. 서론

1.1 연구 배경

지구 내부에는 많은 에너지가 보존되어 있으며, 대륙이 팽창하면 지표부에도 변화가 일어난다. 지진(earth quake)은 그 변화 중의 하나이며, 지각내 또는 맨틀 상부에 급격한 변동이 일어나고, 짧은 시간에 에너지가 방출되어서 지상에 급격한 진동이 일어나는 현상이다⁽¹⁾. 지진의 경우 직접적인 지진파에 의한 피해도 막대하지만, 지진 발생 이후에 뒤따르는 연쇄 과정에 의한 피해가 더욱 심각할 수 있다. 예를 들면 지진 발생 지역의 수많은 발화원에서 동시 다발적으로 발생한 화재로 인한 화학공장, 석유저장소, 원자력발전소 등에서 대규모 폭발이나 위험물의 유출로 인한 피해와 해저에서 발생한 지진의 경우 해일 등에 의한 피해가 발생할 수도 있다. 따라서 지진이 발생할 때 피해의 규모를 줄이기 위해서 구조물이나 기기들의 지진에 대한 안전성 확보가 필요하다.

국내에서 최초로 지진계를 설치하고 지진을 관측한 것은 1905년으로 역사가 100년 남짓하다. 그래서 국내에서 발생한 지진은 1905년 이전의 역사 지진과 이후의 계기 지진으로 나눌 수 있고, 역사 지진의 경우 고문헌 등에서 그 기록을 찾을 수 있다. 한반도에서는 서기 2년부터 1981년까지 2366개의 지진이 발생하였다. 한반도는 지진이 빈번하게 발생하는 일본이 인접해 있지만 지진에 대해서 일반적으로 안전 지역으로 받아들여지고 있다. 하지만 2007년 1월 20일 발생한 오대산지진(규모 4.8)과 최근 국내외에서 발생한 일련의 큰 지진으로 인하여 내진설계의 필요성과 지진피해에 대한 경각심이 크게 고조되고 있다⁽²⁾.

지진에 대한 안전성 확보가 반드시 요구되는 시설 중의 하나인 원자력발전소는 원자로 내의 막대한 방사능과 에너지가 잠재적인 위험성을 안고 있어서

지진에 의한 사고 발생시 심각한 환경오염과 수많은 인명피해를 가져 올 수 있기 때문에 원자력발전소에서 작동되는 기기는 엄격한 내진 설계가 필요하며, 사고 조건하에서 정상적으로 작동할 수 있도록 설계되어야 한다. 원자력발전소에 사용되는 제어설비 또는 모니터링 시스템 등에 관련한 제반 설비의 주요 부품 및 기기는 성능에 영향을 미칠 수 있는 자연현상, 가상사고 등의 환경조건에서 고유의 안전 기능을 수행할 수 있음을 입증하는 기기검증(equipment qualification)이라는 절차가 설계 및 제작단계에서 요구된다. 기기검증의 영역으로는 내환경 기기검증, 내지진 기기검증, 내전자와 기기검증이 있으며, 본 연구에서 다루고자 하는 내지진 기기검증은 내진 해석(seismic analysis)과 내진 시험(seismic test)의 두 가지 방법으로 구분할 수 있다⁽³⁾. 특히 원자력 발전소의 기기는 ASME코드⁽⁴⁾에 의해서 설계, 제작, 검증을 엄격히 규제하고 있다.

1.2 연구 목적 및 내용

일반적인 구조물의 내진 설계를 위한 동적 해석은 국내에서도 국외에 못지 않은 경험과 기술을 보유하고 있다. 본 연구에서는 원자력발전소의 핵연료 재충전 기계의 유한요소 해석을 통해 내진 안전성을 검증하고자 한다. 유한요소 해석을 위해 ANSYS 11.0의 자체 모델러를 이용하여 쉘요소와 빔요소로 이루어진 유한요소 모델을 완성하였다. 이를 이용하여 고정하중(dead load)과 활하중(live load)을 고려한 운전조건(operating condition)과 안전정지지진(SSE : safe shutdown earthquake) 하중을 고려한 SSE 조건에 대한 유한요소 해석을 수행하였다.

SSE 조건에서는 모드 해석(modal analysis)을 수행하여 동적 특성을 파악하고, 설계 규격으로 제시된 요구 응답 스펙트럼(required response spectrum)을 이용한 응답 스펙트럼 해석(response spectrum analysis)을 수

행하여 핵연료 재충전 기계의 안전성을 평가하였다.

선행된 유한요소 해석을 통해 얻은 결과를 이용하여 유한요소 해석 모델의 간략화로 인해 고려되지 않은 볼트부와 용접부에 대한 응력해석을 수행하였다. 이러한 과정을 거쳐서 해석의 과정과 해설 결과를 이용한 상세설계 과정을 표준화하여 설계프로젝트에 활용하는 것이 논문의 목적이다.

2. 내진평가를 위한 유한요소 해석의 이론적 배경

유한요소법은 연속체를 여러 개의 적절한 크기의 유한요소(finite element)로 나누어서 각 절점의 값들을 변수로 하는 미분 방정식을 변분원리(variational principle), 가중잔여법(method of weighted residual), 에너지 균형법(energy balance approach)등을 이용하여 세우고 이 미분방정식을 이용하여 유한요소방정식을 만들어 각 절점에서의 변수 값들을 구하는 방법이다. 유한요소법을 활용한 내진평가를 위해 모드해석과 스펙트럼해석이 이루어져야 한다.

2.1 모드 해석 이론

본 연구에서 사용한 모드 해석 이론을 요약하면 다음과 같다. 외부로부터 외력 벡터 $\{F(t)\}$ 를 바든 다 자유도 시스템(multi degree-of-freedom system)의 운동방정식은 다음과 같다.

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{F(t)\} \quad (2.1)$$

여기서 $[M]$, $[C]$, $[K]$ 는 각각 질량행렬(mass matrix), 감쇠행렬(damping matrix), 강성행렬(stiffness matrix)을 나타내고, $\{\ddot{x}(t)\}$, $\{\dot{x}(t)\}$, $\{x(t)\}$, $\{F(t)\}$ 는 각각 절점의 가속도, 속도, 변위, 작용 하중 벡터를 나타낸다. 모드 해석을 위하여 식 (2.1)에서 감쇠행렬과 외력 벡터를 제외한 자유진동 시스템으로 나타내면 식 (2.2)를 얻을 수 있다.

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{0\} \quad (2.2)$$

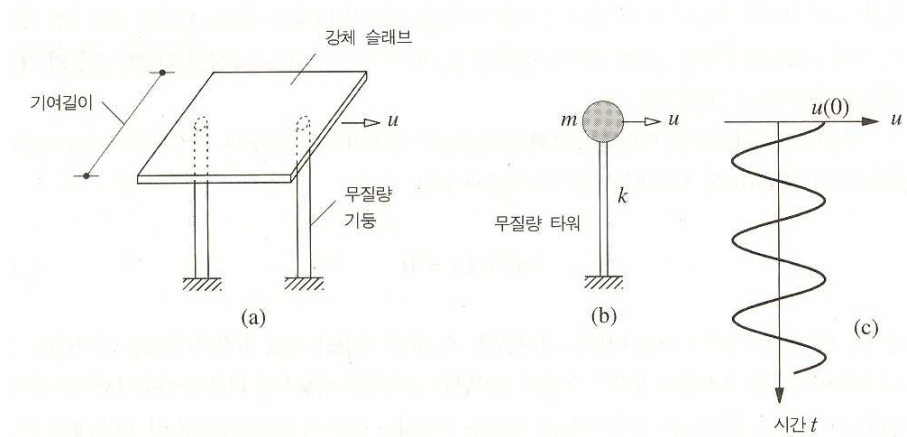


Fig. 1 Idealized model

변위 벡터 $\{x(t)\}$ 는 위치와 시간의 함수로서, 이 변위 벡터를 공간적인 형상 벡터 $\{\Phi\}$ 와 시간적인 변화함수 $q(t)$ 의 곱으로 정의한다. 그리고 $q(t)$ 를 조화함수로 나타내면 식 (2.3)과 같이 나타낼 수 있고, 이 식을 (2.2)에 대입하면 식 (2.4)를 유도할 수 있다.

$$\{x(t)\} = \{\Phi\}q(t) = \{\Phi\}\sin\omega t \quad (2.3)$$

$$(-\omega^2[M] + [K])\{\Phi\} = \{0\} \quad (2.4)$$

식 (2.4)에서 모드 형상 벡터인 $\{\Phi\}$ 가 0이 아닌 벡터가 되기 위해서는 고유치 (eigenvalue)를 얻기 위한 특성방정식(characteristic equation) 식 (2.5)를 만족해야 한다.

$$\det(-\omega^2[M] + [K]) = 0 \quad (2.5)$$

식 (2.5)를 풀면 자유도 n 개의 서로 다른 ω 를 구할 수 있고, 크기가 작은 것

부터 정리하여 $w_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 로 나타내고, 이를 고유진동수(natural frequency)라 정의한다. 그리고 w_i 에 대응하는 형상 벡터를 $\{\Phi\}_i$ 로 나타내고, 이 n 개의 형상 벡터들을 식 (2.6)과 같이 행렬로 표기하여 자유진동 모드행렬 $[\Phi]$ 라 한다.

$$[\Phi] = [\{\Phi\}_1, \{\Phi\}_2, \dots, \{\Phi\}_n] \quad (2.6)$$

다음으로 모드 기여도(mode participation factor)와 유효 질량(effective mass)을 정의하였다. 지반 변위를 $x_g(t)$ 라 하고 지반 변위에 대한 구조물의 상대 변위를 $x(t)$ 라 할 때 구조물의 절대 변위 $x_t(t)$ 는 $x_t(t) = x_g(t) + x(t)$ 이다. 식 (2.2)를 절대 변위 $x_t(t)$ 의 항으로 정리하면 식 (2.7)과 같다.

$$[M]\{\ddot{x}_t(t)\} + [K]\{x_t(t) - x_g(t)\} = \{0\} \quad (2.7)$$

그리고 식 (2.7)을 상대 변위 $x(t)$ 에 관한 식으로 표현하면 식 (2.8)로 나타낼 수 있다.

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = -[M]\{\ddot{x}_g(t)\} \quad (2.8)$$

여기서 변위 벡터 $\{x(t)\}$ 를 식 (2.9)와 같이 자유진동 모드행렬과 각각의 모드에 대응하는 시간변화 함수 벡터 $\{q(t)\}$ 로 나타낼 수 있다.

$$\{x(t)\} = [\Phi]\{q(t)\} \quad (2.9)$$

식 (2.9)를 식 (2.8)에 대입하고 양변에 $[\Phi]^T$ 를 선승하면, 자유진동 모드행렬의 질량행렬과 강성행렬에 대한 직교성(orthogonality)때문에 식 (2.10)과 같이 각 모드좌표계에 대하여 비연성된 방정식을 얻을 수 있고, 식 (2.10)의 우변을 식 (2.11)과 같이 모드 기여도 벡터 $\{\mathcal{L}\}$ 로 정의할 수 있다.

$$[\Phi]^T[M][\Phi]\{\ddot{q}(t)\} + [\Phi]^T[K][\Phi]\{q(t)\} = -[\Phi]^T[M]\{\ddot{x}_g(t)\} \quad (2.10)$$

$$\{\mathcal{L}\} \equiv [\Phi]^T[M]\{1\} \quad (2.11)$$

여기서 $\{\mathcal{L}\}$ 의 i 번째 요소 \mathcal{L}_i 를 i 번째 진동 모드에 대한 기여도라 부르고, 유효 질량(Me)은 i 번째 모드 벡터 $\{\Phi\}_i$ 를 이용하여 식 (2.12)와 같이 정의된다.

$$Me = \frac{\mathcal{L}_i^2}{\{\Phi\}_i^T[M]\{\Phi\}_i} \quad (2.12)$$

여기서 모드 벡터 $\{\Phi\}_i$ 가 질량행렬에 대하여 정규화된 벡터(normalized vector)이면, $\{\Phi\}_i^T[M]\{\Phi\}_i$ 는 1이기 때문에 유효 질량은 모드 기여도의 제곱으로 표현되고 유효 질량을 모두 합하면 구조물의 전체 질량이 된다. 모드 기여도와 유효 질량은 구조물의 모드들이 구조물의 동특성에 미치는 영향 정도를 알 수 있는 인자가 된다.

2.2 응답 스펙트럼 해석 이론

지진과 같은 동적하중에 의한 구조물의 동적거동은 구조물의 고유진동주기와 감쇠비 등의 동적특성에 따라서 크게 달라진다. 지진하중이 가해지는 동안 구조물에 발생하는 변위, 속도, 가속도 및면전단력, 전도모멘트 등의 응답은 시간이력 해석법(time history analysis)에 의하여 결정될 수 있다. 그러나 이 방법을 사용하여 구조물의 지진거동을 알아내는 것은 상당히 번거로울 뿐만 아니라 내진설계를 위하여 합당한 입력 지반운동을 적절히 채택하는 것이 매우 어렵다. 그러므로 강진지역에서는 실제 내진설계에서 여러 가지의 지반운동에 대하여 시간이력해석법에 의한 구조물의 거동을 해석하고 설계에 반영한다⁽⁵⁾.

일반적으로 지진 발생시 시간에 대해 불규칙적인 하중이 대상 구조물에 가해진다. 따라서 정확한 해석을 위해서는 시간영역에서 구조물의 과도응답을 구해야 한다. 그러나 과도응답을 구하기 위해서는 많은 시간과 노력이 소요되기 때문에 간단하면서도 비교적 정확한 답을 구할 수 있는 응답 스펙트럼 해석 방법이 많이 사용되고 관련 이론은 다음과 같다.

식 (2.8)에 감쇠항을 고려하면 식 (2.13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = -[M]\{\ddot{x}_g(t)\} \quad (2.13)$$

그리고 제 2.1절과 같은 절차에 의하여 식 (2.14)와 같은 비연성된 방정식을 얻을 수 있다.

$$\mu_i \ddot{q}_i(t) + 2\mu_i \xi w_i \dot{q}_i(t) + \mu_i w_i^2 q_i(t) = -\mathcal{L}_i \ddot{x}_g(t) \quad (2.14)$$

여기서 $\mu_i = \{\Phi\}_i^T [M] \{\Phi\}_i$, $2\mu_i \xi w_i = \{\Phi\}_i^T [C] \{\Phi\}_i$, $\mu_i w_i^2 = \{\Phi\}_i^T [K] \{\Phi\}_i$, $\mathcal{L}_i = \{\Phi\}_i^T [M] \{1\}$ 로 정의하고, 식 (2.14)를 식 (2.15)와 같은 형태로 변형하면

최대값 $q_{i,\max}$ 는 식 (2.16)과 같이 구할 수 있다.

$$\mu_i \ddot{q}_i(t) + 2\mu_i \xi w_i \dot{q}_i(t) + \mu_i w_i^2 q_i(t) = -\mu_i \ddot{x}_g(t) \left(\frac{\mathcal{L}_i}{\mu_i} \right) \quad (2.15)$$

$$q_{i,\max} = \max |q_i(t)| = \frac{\mathcal{L}_i}{\mu_i} S_d(w_i, \xi_i) \quad (2.16)$$

여기서 S_d 는 고유진동수 w_i 와 모드 감쇠비 ξ_i 를 갖는 1 자유도계에서 입력 스펙트럼으로부터 구해진 최대 변위로 스펙트럴 변위(spectral displacement)이고, i 번째 모드에 관련된 구조물의 최대 변위 $\{x\}_{i,\max}$ 는 식 (2.17)과 같이 구할 수 있다.

$$\{x\}_{i,\max} = \{\Phi\}_i q_{i,\max} = \{\Phi\}_i \frac{\mathcal{L}_i}{\mu_i} S_d(w_i, \xi_i) \quad (2.17)$$

위에서 구한 각 모드의 최대값을 조합하기 위해서 보통 SRSS(Square Root of Sum of Squares) 방법을 가장 많이 사용하며, SRSS 방법을 사용한 전체 응답 R_a 는 총 n 개의 모드를 추출할 때 다음과 같다.

$$R_a = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\{x\}_{i,\max})^2} \quad (2.18)$$

3. 핵연료 취급 장치의 유한요소 모델

3.1 해석 및 설계절차

핵연료 재충전 기계(이하 RM)의 내진해석을 위한 해석 및 설계절차는 크게 형상입력, 재질 및 경계조건 입력, 구조해석, 고유진동수 해석, 스펙트럼 해석 그리고 결과 출력으로 나눌 수 있다.

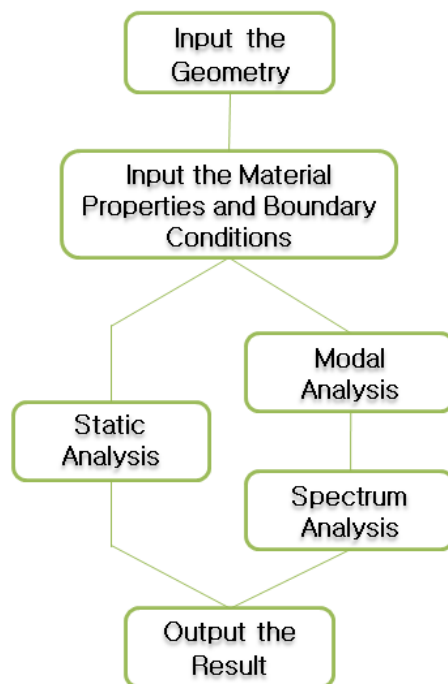


Fig. 2 Analysis process

형상입력 단계에서는 FEM해석을 수행할 유한요소모델의 형상을 입력하는 작업을 수행하며, 재질 및 경계조건 입력 단계에서는 유한요소모델의 각 부분에 재질 및 경계조건을 부여한다. 완성된 유한요소모델과 해석 조건하에서 고정하중(dead load)와 활하중(live load)을 고려한 구조해석을 수행하고, 내진

평가를 위해 고유진동수 해석과 스펙트럼 해석을 수행한다. 고유진동수 해석에서는 스펙트럼 해석에 사용될 유한요소모델의 모드를 계산하며, 스펙트럼 해석에서는 고유진동수 해석을 통해 얻은 모드와 응답스펙트럼의 가속도 값을 이용하여 내진 해석을 수행한다. 이러한 해석을 통해 결과를 출력하고 내진안정성을 평가한다.

3.2 유한요소 모델링

원자력 발전소의 핵연료 취급 장치인 재충전 기계의 내진해석을 위해 유한요소 모델링을 수행하였다. 실제형상은 Fig. 3과 같이 2차원 도면으로 나타내었다. RM은 크게 브릿지, 트롤리, 마스트, 호이스트 프레임, 호이스트 박스 그리고 주행로로 구성되어 있다. 유한요소 모델링을 수행함에 있어서 RM과 주행로의 모델링을 독립적으로 수행할 수 있는지를 판단하기 위해 전력산업기술기준(KEPIC : Korea Electric Power Industry Code)⁽⁶⁾의 MCN 2153.5(크레인 주행로의 분리기준)을 참조하였다. 크레인이 주행로와 분리되어진 상태로 고려되어질 때는, 아래 기술된 (1) 또는 (2)의 기준을 만족해야 한다.

- (1) $R_m < 0.01$ 이면 R_f 크기와 상관없이 분리되어질 수 있다.
- (2) $0.01 \leq R_m \leq 0.1$, $R_f \leq 0.8$ 또는 $R_f \geq 1.25$ 이면 분리되어질 수 있다.
- (3) $R_m \geq 0.1$ 또는 $0.8 \leq R_f \leq 1.25$ 인 경우, 주행로의 모델은 크레인 모델을 포함해야 한다.

R_m 과 R_f 의 정의는 아래와 같다.

$$R_m = \frac{\text{크레인의 전체 질량}}{\text{주행로계의 질량}} \quad (3.1)$$

$$R_f = \frac{\text{크레인의 기본 진동수}}{\text{지배적인 주행운동의 진동수}} \quad (3.2)$$

핵연료 취급 장치인 RM의 주행로계는 지면과 밀착된 구조를 가지므로 주행로계의 질량은 무한대로 볼 수 있다. 그러므로 (1)의 기준을 만족하므로 RM의 내진설계에 있어서 주행로와 분리되어진 상태로 고려되어 질 수 있다.

본 연구에서는 해석프로그램으로 상용코드인 ANSYS 11.0⁽⁷⁾을 사용하여 Fig. 4와 같은 형태로 모델을 단순화 하여 나타내었다. 유한요소 모델은 RM의 운전상황을 고려한 모델과 퓨어(fuel)를 제외한 주차상태를 고려한 모델에 대한 총 2가지의 유한요소 모델을 완성하여 Fig. 5 ~ 6에 나타내었다. RM의 각 Case 별 모델에 대한 설명은 Table 1에 정리하였다.

사용된 요소는 4절점 쉘 요소(elastic shell element, SHELL63) 42879개, 2절점 빔 요소(elastic beam element, BEAM4) 1577개, 1절점 점 요소(structural mass element, MASS21) 22개이며, 절점 45645개로 이루어져있다. 사용된 요소의 형상은 Fig. 7에 나타내었다.

Table 1 Analysis cases

| | Description |
|--------|--|
| Case A | The trolley is at the end of the bridge. The hoist box in the full up position with fuel. |
| Case B | The trolley is at the end of the bridge and the restraining pins are in place. The hoist box in the full up position with no fuel. |

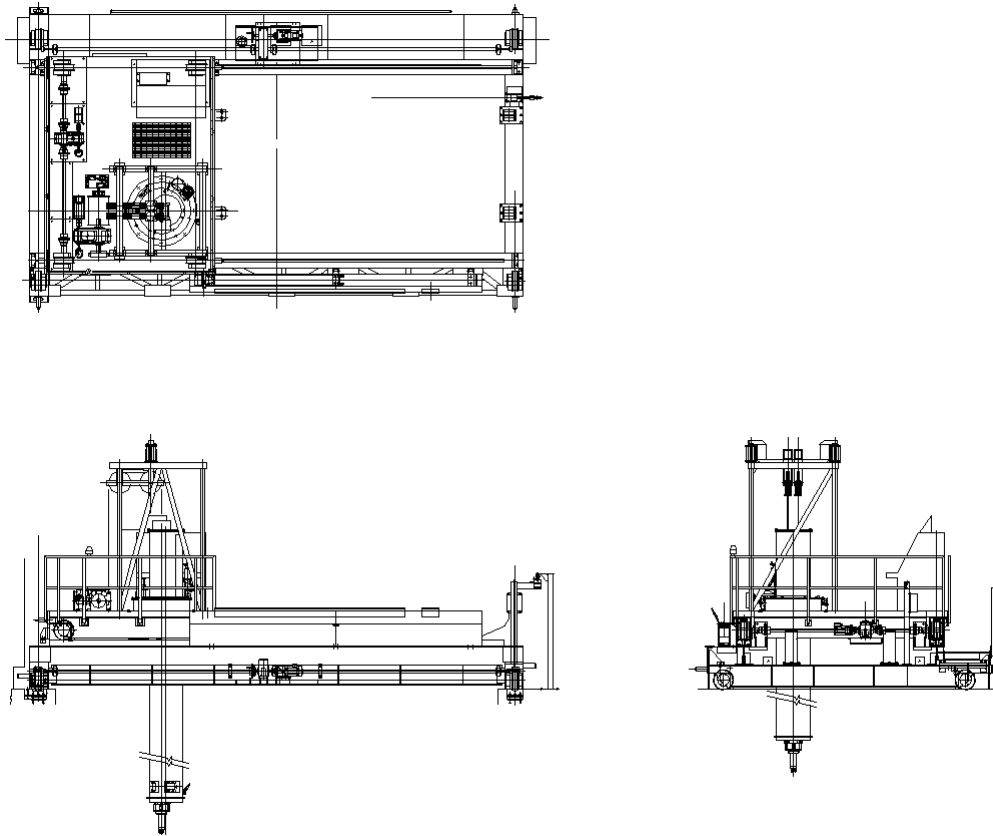


Fig. 3 Component arrangement⁽⁸⁾

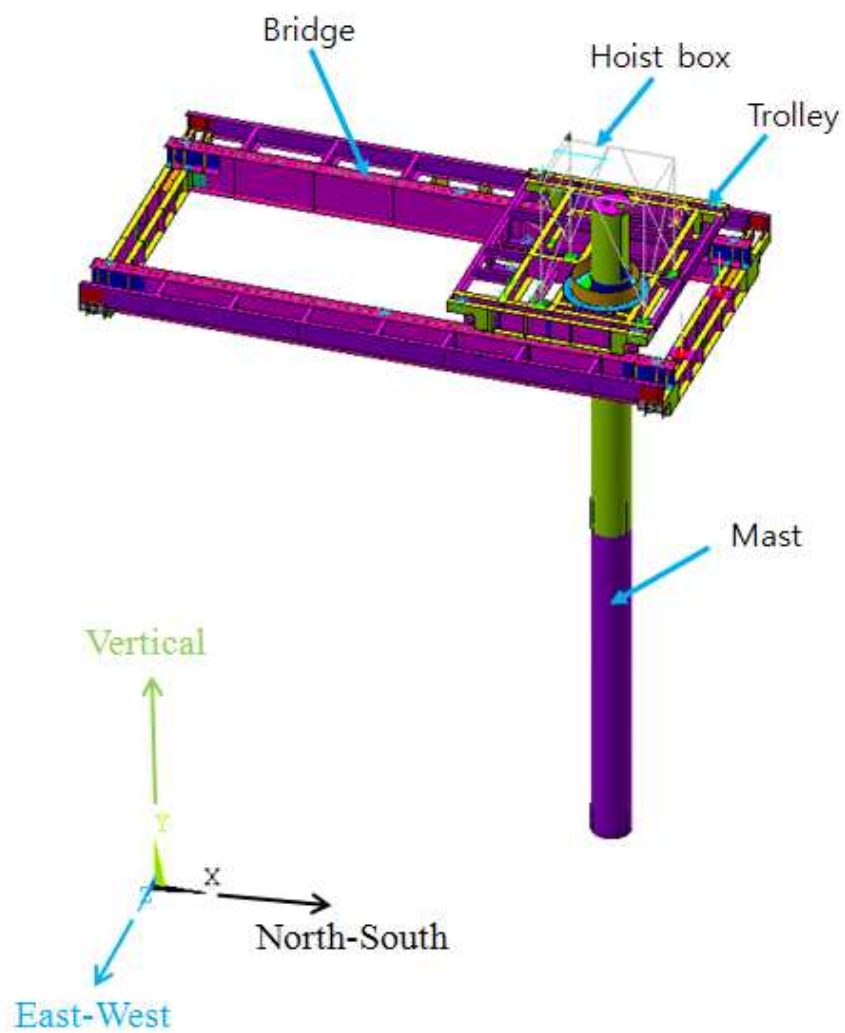


Fig. 4 Modeling of refueling machine (Case B)

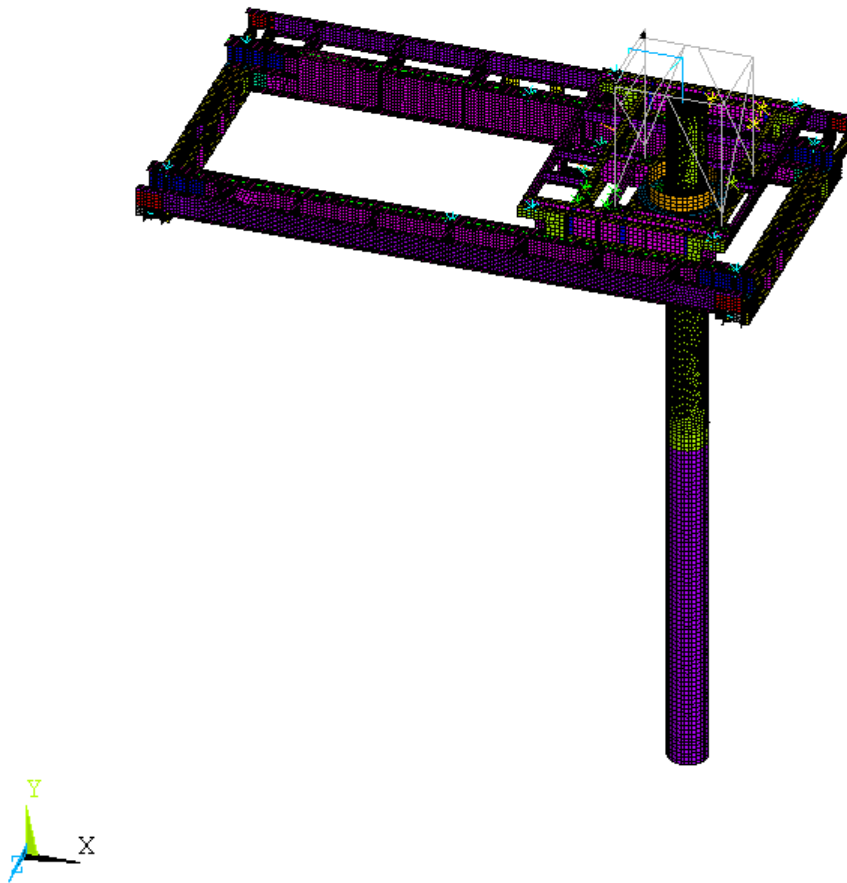


Fig. 5 Mesh shape for Case A

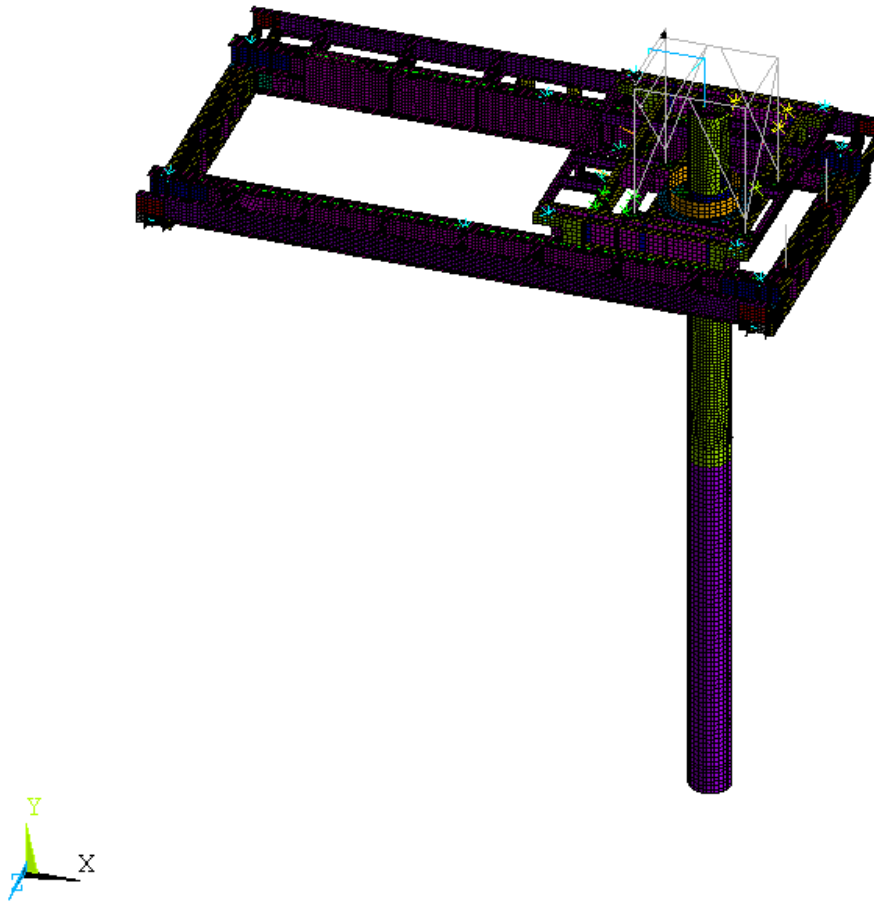
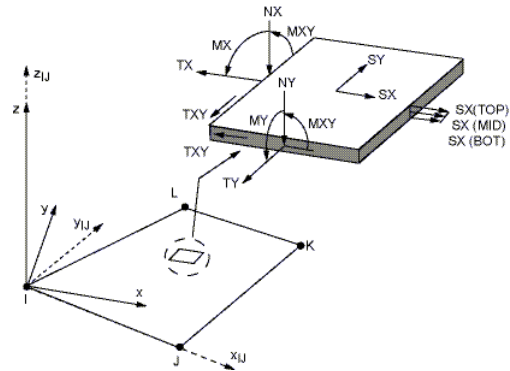
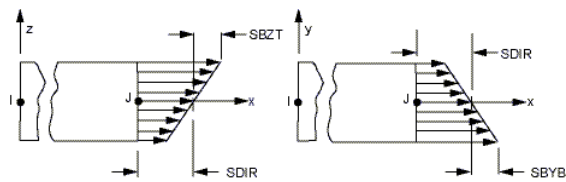


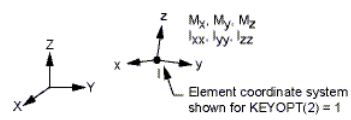
Fig. 6 Mesh shape for Case B



(a) SHELL63



(b) BEAM4



(c) MASS21

Fig. 7 Element geometry

3.3 해석 조건

핵연료 취급 장치 RM은 일반 구조용 압연강재인 SS400, A36과 스테인리스강인 SUS304를 사용하였으며, 물성치는 Table 2에 나타내었다. 각 물성치의 밀도는 유한요소 모델링을 통해 간략화 되면서 반영되지 않은 질량에 대한 등가 밀도를 적용하였다. RM에 설치된 컨트롤 콘솔, 드라이브, 뉴매틱 컨트롤 패널, 더미 푸어 등의 집중된 질량을 가지는 구조물의 경우 1절점 요소인 MASS21을 이용하여 적용하였으며, Table 3에 나타내었다. 또한 RM의 유한요소모델에 사용된 2절점 요소인 BEAM4의 단면정보와 4절점 요소인 SHELL63의 두께 정보는 Table 4, Table 5에 각각 정리하였다.

Table 2 Material properties

| No. | Material | Modulus of elasticity (GPa) | Poisson's ratio | Yield stress, σ_y (MPa) | Density (kg/m ³) | Object |
|-----|------------|-----------------------------|---------------------|--------------------------------|------------------------------|-----------|
| 1 | A36, SS400 | 203 | 0.3 ⁽⁹⁾ | 248 | 7850 ⁽⁹⁾ | |
| 2 | SUS304 | 195 | 0.29 ⁽⁹⁾ | 207 | *11000 | mast |
| 3 | SUS304 | 195 | 0.29 | 207 | *15000 | hoist box |
| 4 | A36, SS400 | 203 | 0.3 | 248 | *9800 | bridge |
| 5 | A36, SS400 | 203 | 0.3 | 248 | *12800 | trolley |

*11000kg/m³ : equivalent density for mast (2474kg)

*15000kg/m³ : equivalent density for hoist box (1685kg)

*9800kg/m³ : equivalent density for bridge (9564kg)

*12800kg/m³ : equivalent density for trolley (5777kg)

Table 3 Real constant of MASS21

| No. | Description | Mass (kg) |
|-----|-------------------------|-----------|
| 1 | Bridge drive | 180 |
| 2 | Trolley drive | 175 |
| 3 | Hoist drive | 200 |
| 4 | Mast drive | 51 |
| 5 | Control console | 800 |
| 6 | Dummy fuel | 675 |
| 7 | Pneumatic control panel | 200 |
| 8 | Misc. | 150 |

Table 4 Real constant of BEAM4

| No. | Description | Area(m ²) | I _{yy} (m ⁴) | I _{zz} (m ⁴) | Th _y (m) | Th _z (m) | Remark |
|-----|---------------|-----------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------|---------------------|---------|
| 1 | Bar | 0.00544 | 3.28E-06 | 1.86E-06 | 0.064 | 0.085 | Rail |
| 2 | Angle | 0.0019 | 1.80E-06 | 1.80E-06 | 0.1 | 0.1 | |
| 3 | Channel | 0.000865 | 7.44E-07 | 1.36E-07 | 0.04 | 0.075 | |
| 4 | Angle | 0.000684 | 2.33E-07 | 2.33E-07 | 0.06 | 0.06 | |
| 5 | Angle | 0.000375 | 5.56E-08 | 5.56E-08 | 0.04 | 0.04 | |
| 6 | Square tubing | 0.003276 | 4.57E-06 | 4.57E-06 | 0.1 | 0.1 | |
| 7 | Pipe | 0.000692 | 1.63E-07 | 1.63E-07 | 0.0483 | 0.0483 | |
| 8 | Beam | 0.003164 | 7.96E-07 | 7.96E-07 | 0.0635 | 0.0635 | |
| 9 | Beam | 0.008085 | 5.20E-06 | 5.20E-06 | 0.1015 | 0.1015 | Grapple |
| 10 | Bar | 0.0025 | 5.21E-07 | 5.21E-07 | 0.05 | 0.05 | Pad |
| 11 | Beam | 0.006353 | 1.60E-05 | 4.72E-05 | 0.2 | 0.2 | Bracket |

Table 5 Real constant of SHELL63

| No. | Description | Thickness (m) | No. | Description | Thickness (m) |
|-----|-------------|---------------|-----|-------------|---------------|
| 1 | Plate | 0.0190 | 11 | Plate | 0.0120 |
| 2 | Plate | 0.0130 | 12 | Plate | 0.0410 |
| 3 | Plate | 0.0090 | 13 | Plate | 0.0320 |
| 4 | Plate | 0.0507 | 14 | Plate | 0.0227 |
| 5 | Plate | 0.0355 | 15 | Plate | 0.0550 |
| 6 | Plate | 0.0300 | 16 | Plate | 0.0060 |
| 7 | Plate | 0.0427 | 17 | Plate | 0.0210 |
| 8 | Plate | 0.0255 | 18 | Plate | 0.0635 |
| 9 | Plate | 0.0100 | 19 | Plate | 0.0830 |
| 10 | Plate | 0.0160 | 20 | Plate | 0.0390 |

핵연료 취급 장치 RM의 유한요소 모델이 실제 모델의 움직임과 유사하도록 하면서 고유치 해석 결과에서 강체모드가 발생하지 않도록 MCN 2154.3에 따라 적용하였다. 고유치 해석 결과에서 강체모드가 발생했을 경우 강체모드의 모드기여계수(participation factor)가 나머지 모드들의 모드기여계수보다 상당히 크게 될 수가 있다. 그런데 강체모드의 모드기여계수가 지배적이게 되면 스펙트럼 해석에서 모드 조합을 할 때 지배적인 강체모드로 계산결과에 많은 오차가 발생할 수 있다. 따라서 오차 발생을 적게 하기 위해서는 가능한 강체모드가 나타나지 않도록 경계조건을 적용해야 한다⁽¹⁰⁾.

Fig. 6는 핵연료 취급 장치 RM의 경계조건을 적용한 위치를 나타내고 있으며, Table 6에 각 위치의 경계조건을 정리하였다. 경계조건은 회전운동은 모두 자유롭게 풀어주었고, 실제 거동과 유사한 경계조건을 선택하였다.

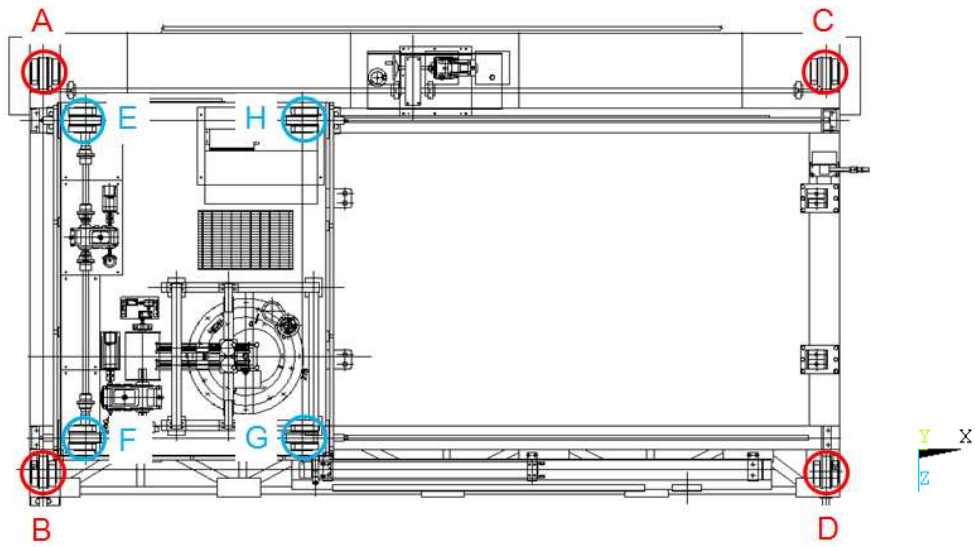


Fig. 8 Position of boundary condition

Table 6 Boundary condition

| | | UX | UY | UZ | ROT X | ROT Y | ROT Z |
|----------------|---|----|----|----|-------|-------|-------|
| Bridge wheels | A | ○ | ○ | ○ | — | — | — |
| | B | ○ | ○ | — | — | — | — |
| | C | — | ○ | ○ | — | — | — |
| | D | — | ○ | — | — | — | — |
| Trolley wheels | E | ○ | ○ | ○ | — | — | — |
| | F | ○ | ○ | ○ | — | — | — |
| | G | — | ○ | ○ | — | — | — |
| | H | — | ○ | ○ | — | — | — |

○ : Fixed boundary condition

4. 핵연료 취급 장치의 구조 및 내진평가

4.1 허용 응력

핵연료 취급 장치 RM에 사용된 재료는 일반 구조용 압연강재인 SS400, A36과 스테인리스강인 SUS304이며, 항복 강도는 각각 248MPa, 207MPa이다. 구조물의 응력상태에 따라 구조물의 고정하중(dead load)과 활하중(live load)을 고려한 운전조건(operating condition)과 안전정지지진(SSE : safe shutdown earthquake) 하중을 고려한 SSE 조건에 대한 허용 응력을 각각 구하여야 한다. 이에 MCN 2311에 따라 아래와 같이 허용 응력을 결정하였으며, Table 7에 각 재료의 허용 응력을 정리하였다.

Operating condition

허용 인장응력(σ_t) : $0.50\sigma_y$

허용 압축응력(σ_c) : $0.50\sigma_y$

허용 전단응력(σ_v) : $0.40\sigma_y$

SSE condition

허용 인장응력(σ_t) : $0.90\sigma_y$

허용 압축응력(σ_c) : $0.90\sigma_y$

허용 전단응력(σ_v) : $0.50\sigma_y$

Table 7 Allowable Stress

(unit : MPa)

| | Operating condition | | SSE condition | |
|------------|---------------------|--------|---------------|--------|
| Material | SS400, A36 | SUS304 | SS400, A36 | SUS304 |
| σ_t | 124.0 | 103.5 | 223.2 | 186.3 |
| σ_c | 124.0 | 103.5 | 223.2 | 186.3 |
| σ_v | 99.2 | 82.8 | 124.0 | 103.5 |

4.2 구조 해석

핵연료 취급 장치인 RM의 고정하중(dead load)과 활하중(live load)을 고려한 운전조건에 대한 안전성 평가를 위해 구조 해석을 수행하였다. RM의 운전 상황에 따른 트롤리와 호이스트 박스의 위치를 고려한 모델과 푸어를 제외한 주차상태의 모델을 고려하여 총 2가지의 해석 결과의 von Mises 응력분포를 Fig. 9 ~ 10에 나타내었다. 각 Case에서의 최대 응력값은 Table 8에 정리하였다. 또한 Fig. 11 ~ 12에 각 Case에 대한 변위 분포를 나타내었으며, Table 9에 주요 component의 최대 변위값을 정리하였다. 운전조건에 대한 구조해석의 결과를 분석해 보면 푸어를 포함하고 있는 Case A가 푸어를 포함하지 않은 Case B보다 큰 응력이 나타내었지만, 두 가지 Case 모두 허용응력을 만족하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 두 가지 Case 모두에서 너비가 8.5m인 긴 구조로 인한 브릿지 중앙부에서 가장 큰 처짐이 발생한다.

Table 8 Maximum stress

(unit : MPa)

| | Case A | Case B |
|--------------------------|--------|--------|
| Maximum von Mises stress | 53.2 | 51.1 |

Table 9 Maximum displacement

(unit : mm)

| Node No. | | Displacement | | | Position |
|----------|-------|--------------|-------------|-------------|---------------|
| | | x-direction | y-direction | z-direction | |
| Case A | 50041 | 0.170 | -1.782 | -0.012 | Bridge ass'y |
| | 34485 | 0.128 | -2.099 | 0.460 | Trolley ass'y |
| | 74841 | 4.053 | -1.266 | 1.908 | Mast |
| Case B | 50041 | 0.126 | -2.064 | 2.121 | Bridge ass'y |
| | 34485 | 0.156 | -1.713 | 1.720 | Trolley ass'y |
| | 74841 | 3.859 | -1.184 | 1.794 | Mast |

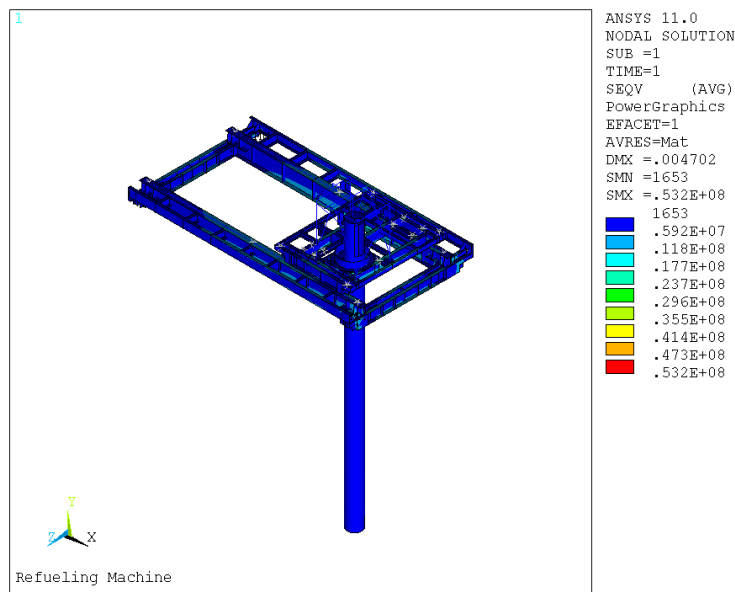


Fig. 9 Distribution of von Mises stress operating condition for Case A

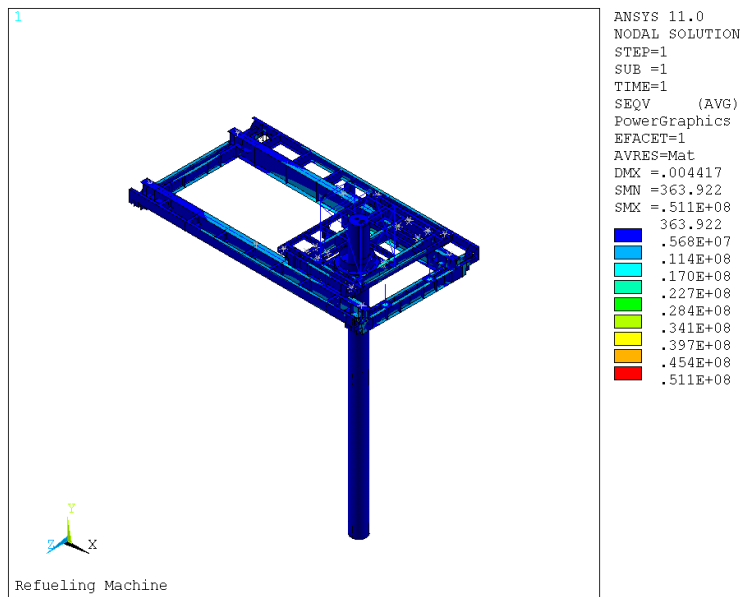


Fig. 10 Distribution of von Mises stress operating condition for Case B

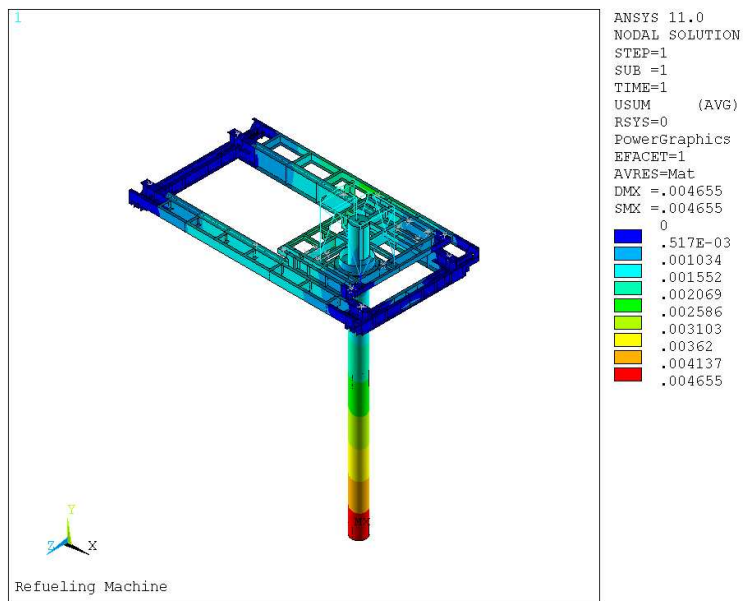


Fig. 11 Distribution of displacement on operating condition for Case A

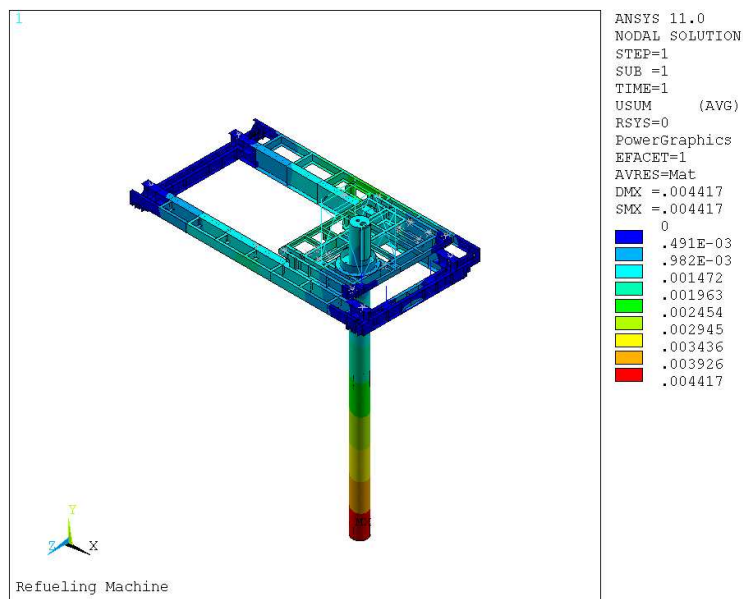


Fig. 12 Distribution of displacement on operating condition for Case B

4.3 고유치 해석

내진해석을 수행할 때에 고려되어야 할 모드를 계산하기 위해서 우선 고유치 해석을 수행하였다. 동적거동에 가장 큰 영향을 끼치는 것은 구조물의 진동수와 진동모드형상(mode shape)이다. 특히 모드형상이 가지는 물리적 의미를 제대로 파악하는 것은 구조물의 지진해석 이론을 이해하고 지진거동을 분석하기 위하여 꼭 필요한 일이다. 다자유도 구조물은 자유도의 수와 같은 모드를 가지며 각각의 모드에는 고유한 진동수가 존재하는데 구조물이 선형거동을 하는 경우에는 먼저 구조물의 동적거동을 각각의 모드별 성분으로 분리하여 구하고 이것을 중첩하는 방법이 매우 유용하다.

4.3.1 고유진동수 분석

내진해석을 수행하기 위한 고유치 해석을 하는 경우에 일반적인 고유치 해석을 하는 경우보다 많은 모드 수를 고려하게 되는데 그 이유는 내진해석을 수행할 때 수 계산에 의하지 않고 모드계수가 기준 값 이상이 되는 모드들에 대해서 모드조합이 이루어지도록 할 수 있게 하기 위함이다. 그런데 복잡한 구조물에 대한 고유치 해석 결과들은 구조물의 국부모드(local mode)까지 포함하고 있으며 이들 국부모드의 모드계수는 기준 값 이하가 되는 경우, 즉 모드 기여계수가 낮은 경우가 많으므로 국부모드들은 모드조합에서 제외되어야 한다. 따라서 조합되는 모드들의 수가 작을 경우에는 조합된 모드들의 전체 모드 기여계수가 크지 않게 되므로 내진해석을 통하여 얻어진 부재에 대한 응력이나 변위와 같은 해석 결과들의 정확성을 확보할 수 없게 된다. 따라서 고유치 해석을 통하여 계산된 고유진동수 중에서 모드계수가 기준 값 이하가 되는 고유진동수를 제외한 나머지 모드의 조합에 대해서는 신뢰성을 확보하기 위해 일반적인 고유치 해석을 수행할 때보다 더 많은 모드를 고려 할 필요가 있다. 여기서, 모드계수(mode coefficient)는 고유치 해석을 통해 얻어진 모드

들 중 최대 모드 기여계수로 각 모드들의 모드 기여계수를 나눈 값을 의미한다. 본 연구에서는 모드계수를 0.01로 설정했으며 이것은 최대 모드 기여계수의 크기에 대해서 1% 크기의 모드기여계수 값을 갖는 모드들에 한해서 모드 조합을 수행한다는 뜻이다.

고유치 해석은 ANSYS 11.0을 이용하여 수행하였고, 해석기법으로는 Block Lanczos법을 사용하였다. 총 50개의 모드의 고유치 해석을 수행하였으며, 각 케이스에 해당하는 해석 결과를 Table 9 ~ 10에 나타내었다. 또한 Case A의 모드 기여도가 높은 6차의 주요 진동 모드형상을 Fig. 9 ~ 14에 보여주고 있다.

Table 10 Modal frequencies for Case A

(unit : Hz)

| Mode sequence number | Modal frequencies | Mode sequence number | Modal frequencies | Mode sequence number | Modal frequencies |
|----------------------------|----------------------|----------------------------|----------------------|----------------------------|----------------------|
| 1 | 0.616 | 18 | 40.287 | 35 | 63.127 |
| 2 | 4.190 | 19 | 41.077 | 36 | 64.641 |
| 3 | 4.398 | 20 | 42.360 | 37 | 65.635 |
| 4 | 11.052 | 21 | 42.543 | 38 | 68.936 |
| 5 | 12.495 | 22 | 45.215 | 39 | 69.616 |
| 6 | 14.743 | 23 | 48.635 | 40 | 70.313 |
| 7 | 15.696 | 24 | 49.133 | 41 | 70.889 |
| 8 | 18.118 | 25 | 49.337 | 42 | 72.991 |
| 9 | 18.632 | 26 | 51.250 | 43 | 73.793 |
| 10 | 20.900 | 27 | 52.932 | 44 | 76.376 |
| 11 | 21.222 | 28 | 53.381 | 45 | 77.118 |
| 12 | 23.901 | 29 | 53.770 | 46 | 79.258 |
| 13 | 25.235 | 30 | 55.484 | 47 | 80.837 |
| 14 | 29.798 | 31 | 56.621 | 48 | 81.487 |
| 15 | 32.467 | 32 | 58.735 | 49 | 83.165 |
| 16 | 35.848 | 33 | 60.627 | 50 | 84.378 |
| 17 | 36.850 | 34 | 62.637 | | |

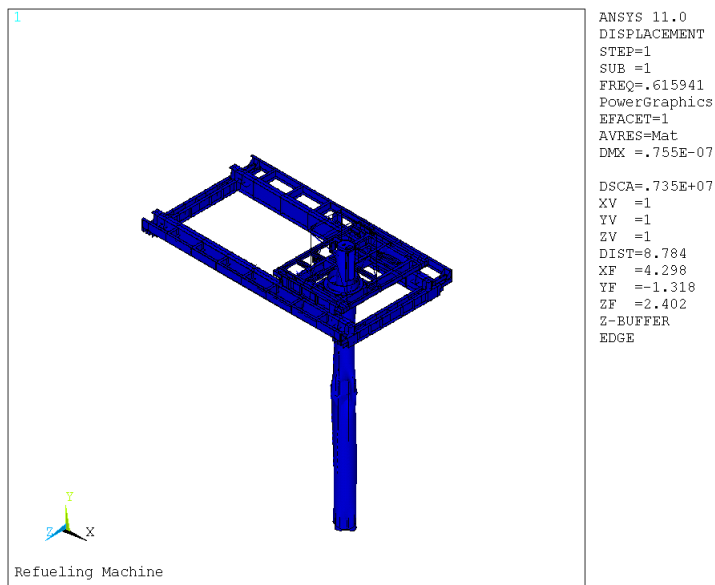


Fig. 13 1st mode shape at 0.616 Hz

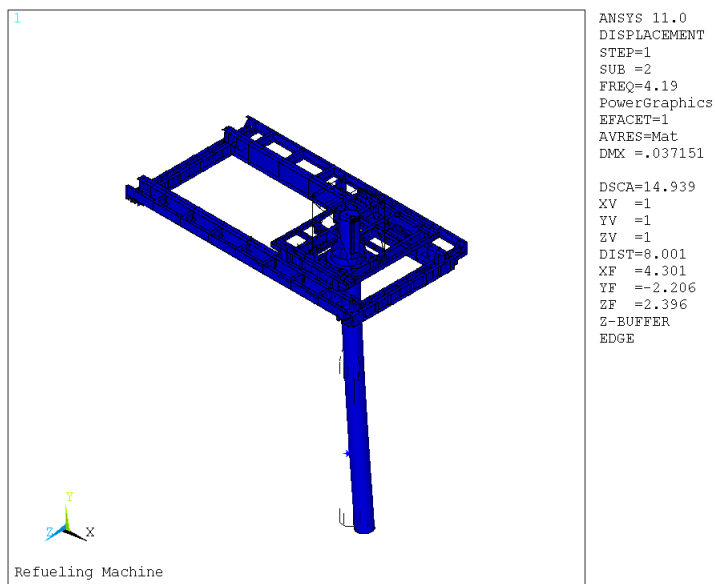


Fig. 14 2nd mode shape at 4.190 Hz

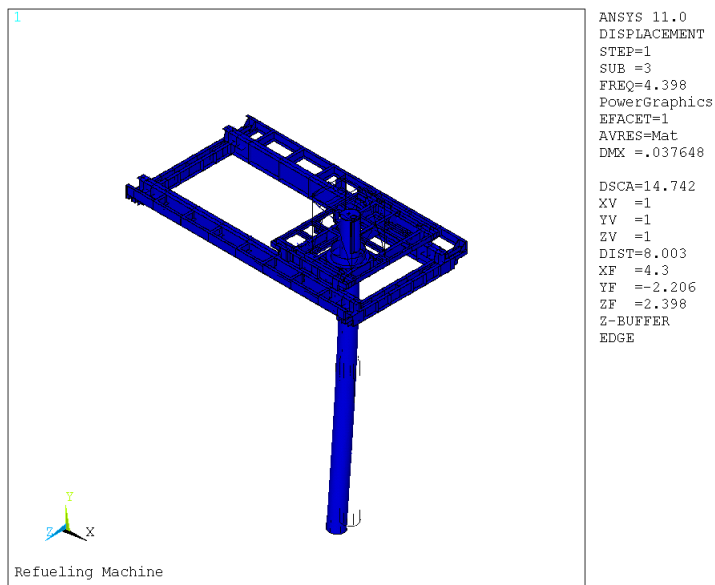


Fig. 15 3rd mode shape at 4.398 Hz

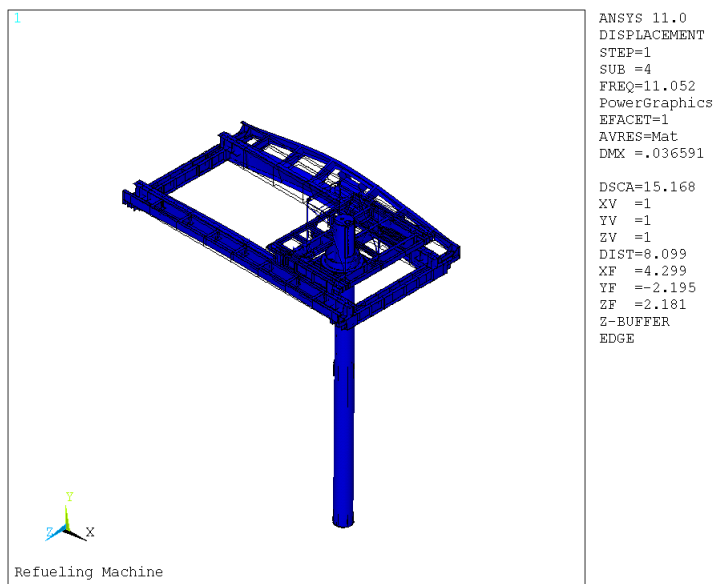


Fig. 16 4th mode shape at 11.052 Hz

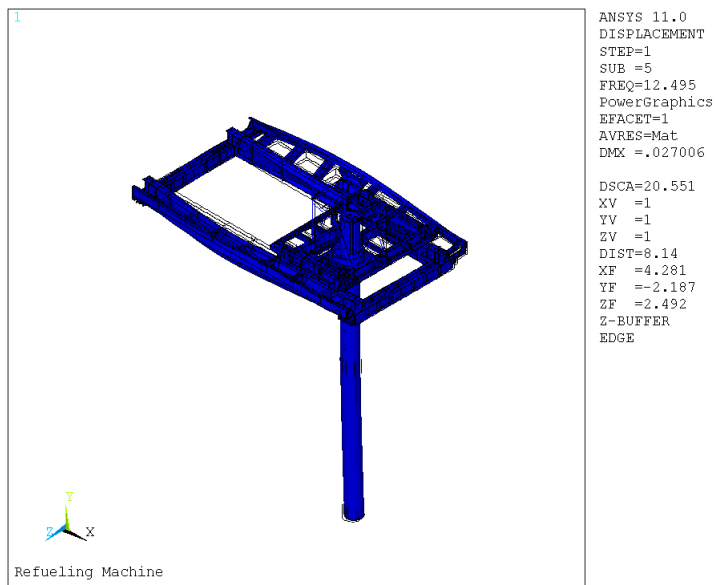


Fig. 17 5th mode shape at 12.495 Hz

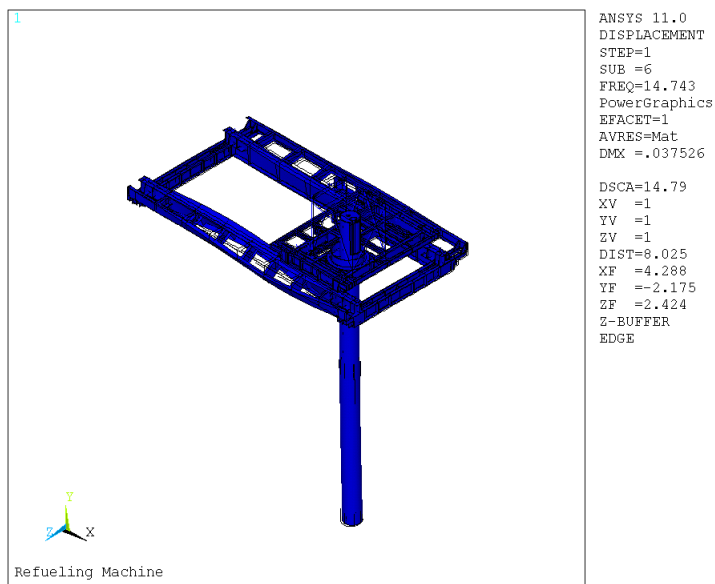


Fig. 18 6th mode shape at 14.743 Hz

Table 11 Modal frequencies for Case B

(unit : Hz)

| Mode sequence number | Modal frequencies | Mode sequence number | Modal frequencies | Mode sequence number | Modal frequencies |
|----------------------------|----------------------|----------------------------|----------------------|----------------------------|----------------------|
| 1 | 0.616 | 18 | 39.351 | 35 | 63.598 |
| 2 | 11.064 | 19 | 39.611 | 36 | 61.715 |
| 3 | 11.399 | 20 | 41.985 | 37 | 66.872 |
| 4 | 12.207 | 21 | 42.597 | 38 | 69.173 |
| 5 | 12.537 | 22 | 45.185 | 39 | 69.994 |
| 6 | 14.722 | 23 | 48.516 | 40 | 70.268 |
| 7 | 15.729 | 24 | 49.180 | 41 | 71.432 |
| 8 | 17.654 | 25 | 49.296 | 42 | 72.766 |
| 9 | 18.397 | 26 | 51.076 | 43 | 74.404 |
| 10 | 20.212 | 27 | 52.906 | 44 | 77.136 |
| 11 | 20.835 | 28 | 53.475 | 45 | 78.368 |
| 12 | 23.270 | 29 | 53.977 | 46 | 80.912 |
| 13 | 23.725 | 30 | 55.469 | 47 | 81.572 |
| 14 | 28.673 | 31 | 55.931 | 48 | 82.977 |
| 15 | 33.041 | 32 | 59.128 | 49 | 83.124 |
| 16 | 34.946 | 33 | 61.180 | 50 | 83.556 |
| 17 | 36.864 | 34 | 62.602 | | |

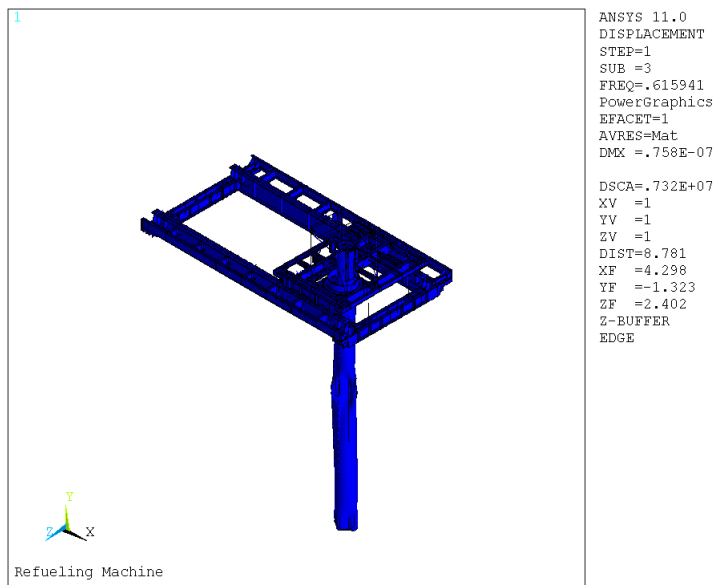


Fig. 19 1st mode shape at 0.616 Hz

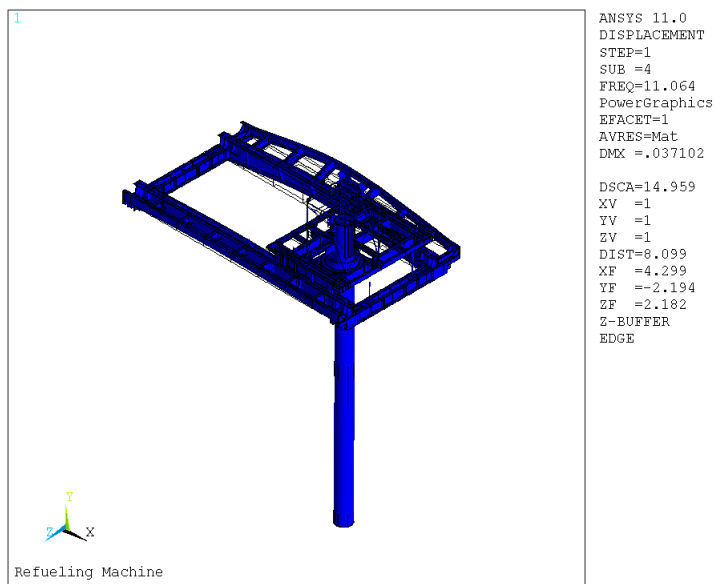


Fig. 20 2nd mode shape at 11.064 Hz

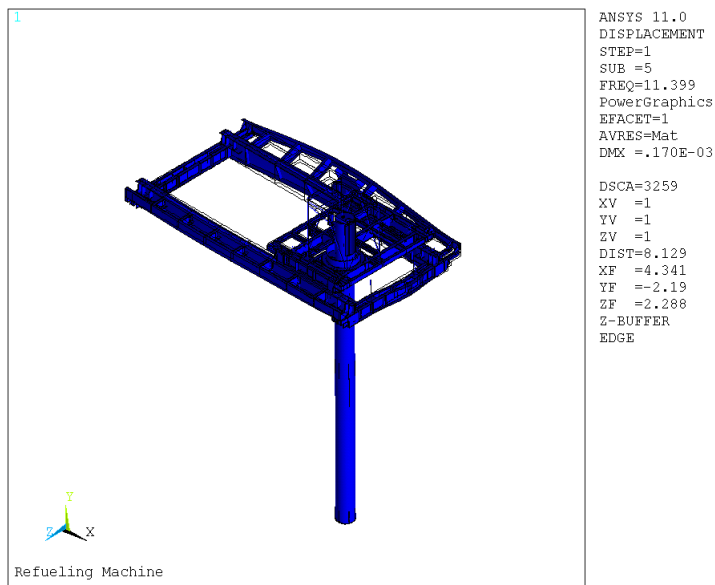


Fig. 21 3rd mode shape at 11.399 Hz

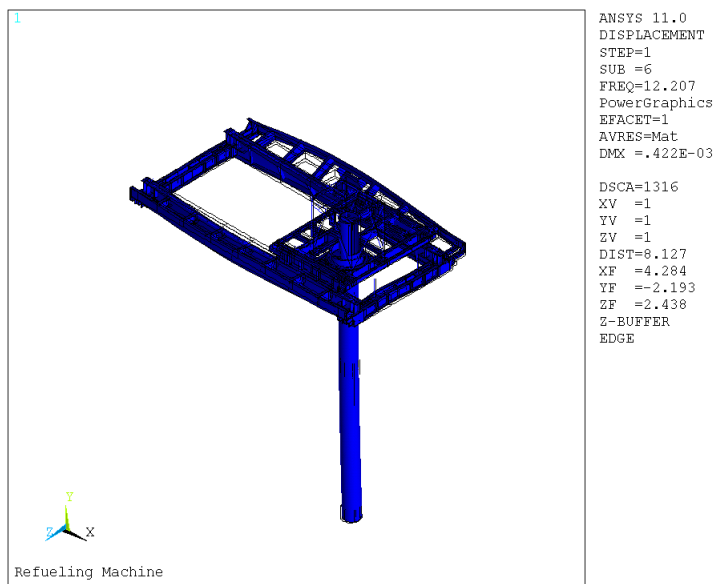


Fig. 22 4th mode shape at 12.207 Hz

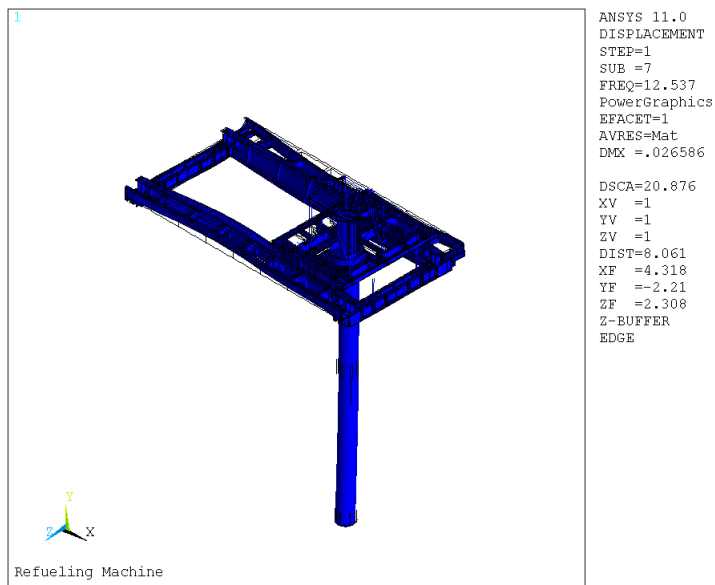


Fig. 23 5th mode shape at 12.537 Hz

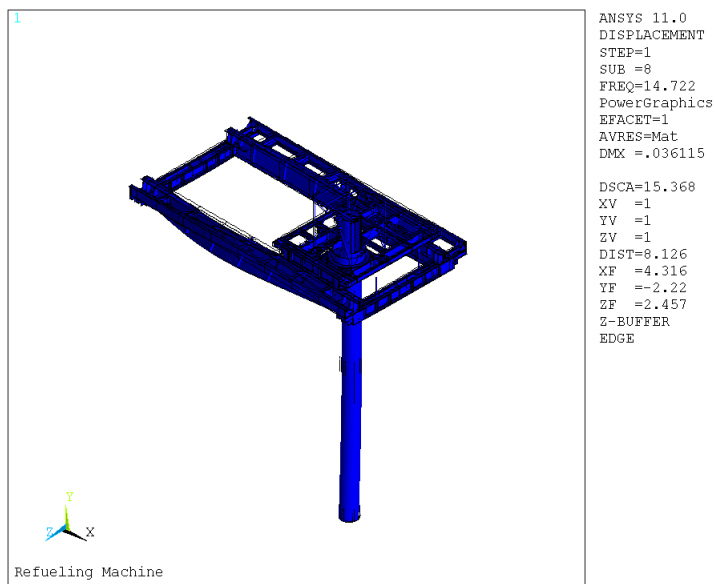


Fig. 24 6th mode shape at 14.722 Hz

4.3.2 유효질량 분석

유효질량의 평가는 내진 해석에 있어서 주어진 입력에 대한 구조물에 주요한 진동 모드를 분석하는 기준으로 사용되므로 핵연료 취급 장치인 RM의 진동 모드에 대한 유효질량을 평가하고 분석하였다.

두 가지 Case가 유사한 고유진동수와 모드를 나타내므로 Case A에 대한 유효질량 분석만을 수행하였다. x, y, z 방향의 유효질량을 Table 12 ~ 14에 정리하였고, 각 방향별 전체 질량에 대한 전체 유효질량의 비율을 Table 15에 정리하였다. Fig. 25에는 계산된 각 주파수별 x, y, z방향의 유효 질량의 크기를 그래프로 나타내었다.

Table 12 Effective mass in the x-direction

(unit : kg)

| Mode sequence number | Effective mass | Mode sequence number | Effective mass | Mode sequence number | Effective mass | Mode sequence number | Effective mass |
|----------------------------|-------------------|----------------------------|-------------------|----------------------------|-------------------|----------------------------|-------------------|
| 1 | 0.0 | 14 | 4.5 | 27 | 64.9 | 40 | 29.5 |
| 2 | 1777.9 | 15 | 8.3 | 28 | 15.1 | 41 | 1.7 |
| 3 | 279.0 | 16 | 279.5 | 29 | 0.0 | 42 | 11.6 |
| 4 | 176.7 | 17 | 100.5 | 30 | 389.1 | 43 | 0.1 |
| 5 | 120.6 | 18 | 133.1 | 31 | 0.5 | 44 | 2.5 |
| 6 | 328.0 | 19 | 21.0 | 32 | 387.7 | 45 | 4.7 |
| 7 | 236.0 | 20 | 8.9 | 33 | 109.0 | 46 | 14.8 |
| 8 | 41.8 | 21 | 86.9 | 34 | 0.2 | 47 | 8.3 |
| 9 | 5016.1 | 22 | 16.7 | 35 | 29.5 | 48 | 4.4 |
| 10 | 832.0 | 23 | 88.4 | 36 | 1.1 | 49 | 2.5 |
| 11 | 13.5 | 24 | 17.6 | 37 | 36.3 | 50 | 0.0 |
| 12 | 190.3 | 25 | 5.3 | 38 | 17.7 | | |
| 13 | 7869.7 | 26 | 20.6 | 39 | 0.2 | | |

Table 13 Effective mass in the y-direction

(unit : kg)

| Mode sequence number | Effective mass | Mode sequence number | Effective mass | Mode sequence number | Effective mass | Mode sequence number | Effective mass |
|----------------------|----------------|----------------------|----------------|----------------------|----------------|----------------------|----------------|
| 1 | 0.0 | 14 | 100.8 | 27 | 171.2 | 40 | 1.9 |
| 2 | 15.3 | 15 | 26.5 | 28 | 7.8 | 41 | 100.0 |
| 3 | 27.9 | 16 | 48.9 | 29 | 0.3 | 42 | 14.6 |
| 4 | 3.9 | 17 | 32.0 | 30 | 0.9 | 43 | 0.7 |
| 5 | 771.8 | 18 | 1.3 | 31 | 3.2 | 44 | 7.2 |
| 6 | 1620.0 | 19 | 148.6 | 32 | 200.0 | 45 | 0.0 |
| 7 | 11743.4 | 20 | 1.4 | 33 | 12.1 | 46 | 17.4 |
| 8 | 18.2 | 21 | 186.4 | 34 | 186.5 | 47 | 0.5 |
| 9 | 948.7 | 22 | 212.2 | 35 | 1.6 | 48 | 2.2 |
| 10 | 75.8 | 23 | 17.3 | 36 | 0.6 | 49 | 0.0 |
| 11 | 202.8 | 24 | 62.2 | 37 | 7.8 | 50 | 0.5 |
| 12 | 1.6 | 25 | 385.6 | 38 | 1.9 | | |
| 13 | 0.2 | 26 | 77.3 | 39 | 5.7 | | |

Table 14 Effective mass in the z-direction

(unit : kg)

| Mode sequence number | Effective mass | Mode sequence number | Effective mass | Mode sequence number | Effective mass | Mode sequence number | Effective mass |
|----------------------|----------------|----------------------|----------------|----------------------|----------------|----------------------|----------------|
| 1 | 0.0 | 14 | 0.1 | 27 | 12.4 | 40 | 5.9 |
| 2 | 299.2 | 15 | 4.8 | 28 | 0.3 | 41 | 10.0 |
| 3 | 1872.3 | 16 | 1368.9 | 29 | 0.0 | 42 | 2.6 |
| 4 | 10187.5 | 17 | 27.2 | 30 | 10.3 | 43 | 0.4 |
| 5 | 350.0 | 18 | 31.2 | 31 | 0.0 | 44 | 26.2 |
| 6 | 2.9 | 19 | 13.4 | 32 | 19.4 | 45 | 38.6 |
| 7 | 58.1 | 20 | 336.4 | 33 | 0.5 | 46 | 99.2 |
| 8 | 369.0 | 21 | 7.7 | 34 | 1.3 | 47 | 33.8 |
| 9 | 103.9 | 22 | 29.5 | 35 | 7.8 | 48 | 2.6 |
| 10 | 111.0 | 23 | 16.0 | 36 | 0.1 | 49 | 5.3 |
| 11 | 237.7 | 24 | 13.0 | 37 | 2.8 | 50 | 1.1 |
| 12 | 10.2 | 25 | 10.5 | 38 | 113.9 | | |
| 13 | 236.4 | 26 | 20.2 | 39 | 18.4 | | |

Table 15 Sum of effective masses

| | Sum of effective masses (ton) | Ratio to total mass (%) |
|-------------|-------------------------------|-------------------------|
| x-direction | 18.804 | 96 |
| y-direction | 17.475 | 89 |
| z-direction | 16.130 | 82 |

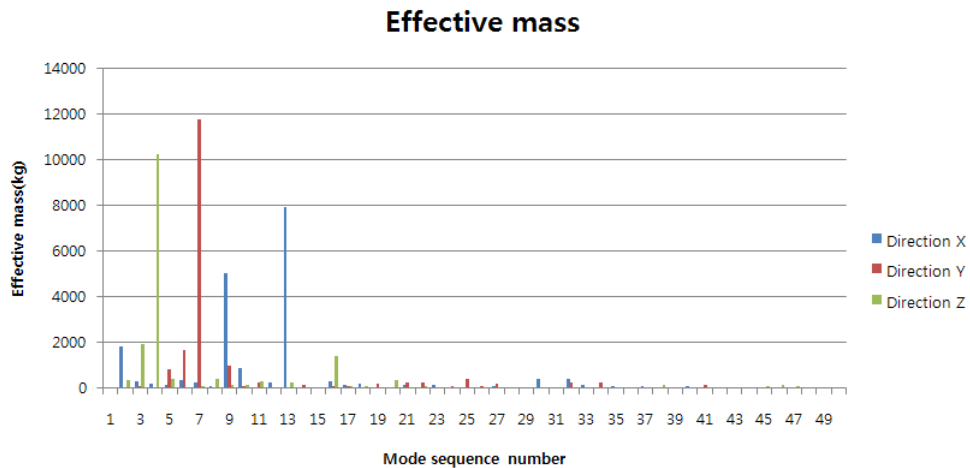


Fig. 25 Effective masses

그래프를 통한 유효 질량을 분석해보면, x방향은 13차 모드에서 가장 크고 y방향은 7차 모드에서 가장 크며, z방향은 4차 모드에서 가장 큰 것을 확인할 수 있다. 각 방향별 영향을 볼 때 남-북 방향을 나타내는 x방향의 유효 질량의 합이 전체 질량의 96%로 지배적이다. 동-서 방향인 z방향과 상-하 방향인 y방향의 유효 질량은 합은 각각 핵연료 재충전 기계의 89%와 82%로 비교적 영향력이 적음을 알 수 있다.

4.4 응답 스펙트럼 해석

구조물에 대하여 내진설계를 할 경우에는 일반적으로 구조물의 최대응답을 기준으로 필요한 강도를 결정하므로 시간변화에 따른 구조물의 시간이력거동을 모두 필요로 하지는 않는다. 따라서 내진설계를 위하여 간편하고 쉬운 방법으로 구조물의 최대 지진응답을 알아낼 필요가 있으며 이러한 목적으로 흔히 사용되는 것이 응답스펙트럼(response spectrum)이다.

Biot와 Housner는 지진으로 인한 구조물의 영향을 나타내기 위하여 진동주기와 구조물의 최대응답과의 관계를 그래프로 나타낸 응답스펙트럼을 제안하였다. 이러한 응답스펙트럼을 사용하면 지진에 의한 지반운동에 관한 정확한 정보를 가지고 구조물에 대하여 복잡한 시간이력해석을 수행해야 하는 번거로움 없이 쉽게 구조물의 최대응답을 근사적으로 구할 수 있기 때문에 현재 구조물의 지진해석 및 내진설계에 널리 이용되고 있다.

4.4.1 응답 스펙트럼

설계용 응답스펙트럼(design response spectrum)은 구조물의 내진설계에서 지진의 영향을 고려하여 지진력을 산정하기 위하여 사용된다. 특정한 지반운동에 대하여 작성된 응답스펙트럼은 진동주기에 따라서 급격히 변하므로 들쭉날쭉한 형태를 가지고 있다. 그리고 여러 가지의 지반운동에 대한 응답 스펙트럼은 서로 다른 형태를 가지게 된다. 그러나 해당 부지에서 예상되는 지반운동은 정확하게 예측하는 것이 불가능하므로 이것으로부터 설계용 응답스펙트럼을 구하기도 어렵다. 미래에 발생할 지반운동에 대하여 정확한 응답스펙트럼을 예측하는 것이 불가능하다면 과거에 발생한 여러 가지의 지진에 의한 응답스펙트럼을 작성할 필요가 있다. 일반적으로 내진설계기준에서는 설계용 응답스펙트럼을 진동주기에 따라서 급격하게 변하지 않는 완만한 곡선으로 규정하고 있다.

지진에 의한 지반가속도의 시간이력을 사용하면 변위응답스펙트럼 뿐만 아니라 속도응답스펙트럼이나 가속도응답스펙트럼을 작성할 수 있다. 그러나 세 가지의 응답스펙트럼을 사용하면 여러 가지로 불편하므로 이것을 하나의 그래프로 표현하는 것이 바람직하다. 그래서 구조물의 응답이 조화함수로 표현될 수 있다고 가정하고 유사속도(pseudo velocity: V)와 유사가속도(pseudo acceleration: A)의 개념을 도입한다. 내진설계기준에서는 유사속도와 유사가속도를 이용하여 설계응답스펙트럼을 설정하는 방법을 채택하고 있다.

구조물에 발생하는 변위는 지반가속도와 구조물의 동적특성에 좌우되지만 만약 변위를 식 (4.1)과 같이 최대치가 u_o 인 조화운동으로 가정하며 이에 대한 속도 및 가속도는 식 (4.2)와 식 (4.3)에서 보는 바와 같이 조화함수로 나타낼 수 있다.

$$u(t) = u_o \sin w_n t \quad (4.1)$$

$$\dot{u}(t) = u_o w_n \cos w_n t \quad (4.2)$$

$$\ddot{u}(t) = -u_o w_n^2 \sin w_n t \quad (4.3)$$

이 식으로부터 변위, 속도 및 가속도의 최대치는 u_o , \dot{u}_o , \ddot{u}_o 임을 알 수 있으며 이것들을 다음과 같이 각각 최대변위 D , 유사속도 V 및 유사가속도 A 로 정의하는데 유사속도 V 및 유사가속도 A 는 D 에 w_n 및 w_n^2 을 곱하여 얻을 수 있음을 알 수 있다.

$$D \equiv u_o \quad (4.4)$$

$$V \equiv \dot{u}_o = D w_n = \frac{2\pi}{T_n} D \quad (4.5)$$

$$A \equiv \ddot{u}_o = D w_n^2 = \left(\frac{2\pi}{T_n} \right)^2 D \quad (4.6)$$

구조물에 저장되는 최대 변형에너지 (E_{so})는 최대 운동에너지와 같으므로 식 (4.7)의 마지막 항에 있는 유사속도 V 는 최대속도와 같음을 알 수 있다.

$$E_{so} = \frac{kD^2}{2} = \frac{k(V/w_n)^2}{2} = \frac{mV^2}{2} \quad (4.7)$$

식 (4.8)에서 보는 바와 같이 최대밀면전단력(V_{bo}) 또는 최대등가적정하중(f_{so})은 질량 m 과 유사가속도 A 의 곱으로 나타낼 수 있는데 구조기술자들이 질량보다는 무게에 친숙하므로 유사가속도를 중력가속도로 나눈 A/g 와 무게의 곱으로 표현하는 방법을 주로 사용한다.

$$V_{bo} = f_{so} = mA = A \frac{W}{g} = \frac{A}{g} W \quad (4.8)$$

여기서 A/g 는 내진설계기준에서 밀면전단력을 구하기 위하여 사용되는 밀면전단계수(base shear coefficient) 또는 횡하중계수(lateral force coefficient)이다. 우리나라의 내진설계기준에서는 밀면전단력을 식 (4.9)와 같이 규정하고 있는데 이것은 밀면전단계수의 형태를 이용하여 전체 무게에 비례하는 밀면전단력을 규정하고 있음을 알 수 있다.

$$V_{bo} = C_s W \quad (4.9)$$

그러나 식 (4.1)와 같은 조화함수와 지진에 의한 구조물의 변위는 어느 정도 차이가 나게 되는 경우가 많다. 그러므로 변위를 시간에 대해서 미분하여 얻게 되는 속도와 가속도는 식 (4.2) 및 식 (4.3)과 어느 정도 차이가 날 수 있다.

그러나 많은 경우에는 진동주기가 매우 길지 않은 경우에는 유사속도 및 유사가속도와 최대속도 및 최대가속도가 큰 차이를 보이지 않는 경향이 있다. 그러므로 최대속도와 최대가속도를 사용하기 보다는 유사속도와 유사가속도를 사용하면 내진설계에 관한 연구에 여러 가지로 편리하므로 유사속도 및 유사가속도를 흔히 사용하고 있다.

본 연구에 사용된 응답스펙트럼 값은 Table 11 ~ 13과 Fig. 15 ~ 17에 North-South, East-West, Vertical 방향에 대하여 각각 나타내었다. SSE조건에 사용된 응답 스펙트럼은 4%의 감쇠비를 적용하였다.

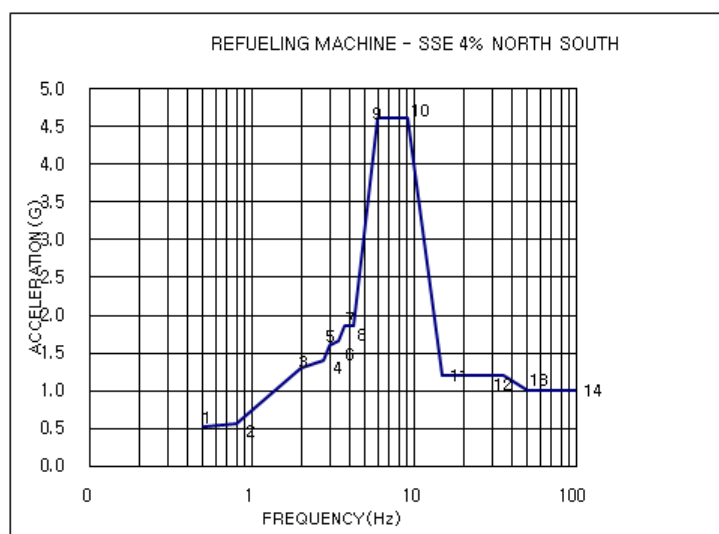


Fig. 26 North-South direction reference response spectra

Table 16 North-South direction reference response spectra

| No. | Reference Response Spectra (Global X) | |
|-----|---------------------------------------|------------------|
| | Frequency (Hz) | Acceleration (g) |
| 1 | 0.50 | 0.52 |
| 2 | 0.80 | 0.55 |
| 3 | 2.00 | 1.30 |
| 4 | 2.75 | 1.40 |
| 5 | 3.00 | 1.60 |
| 6 | 3.40 | 1.65 |
| 7 | 3.70 | 1.85 |
| 8 | 4.20 | 1.85 |
| 9 | 5.90 | 4.60 |
| 10 | 9.10 | 4.60 |
| 11 | 15.00 | 1.20 |
| 12 | 36.00 | 1.20 |
| 13 | 50.00 | 1.00 |
| 14 | 100.00 | 1.00 |

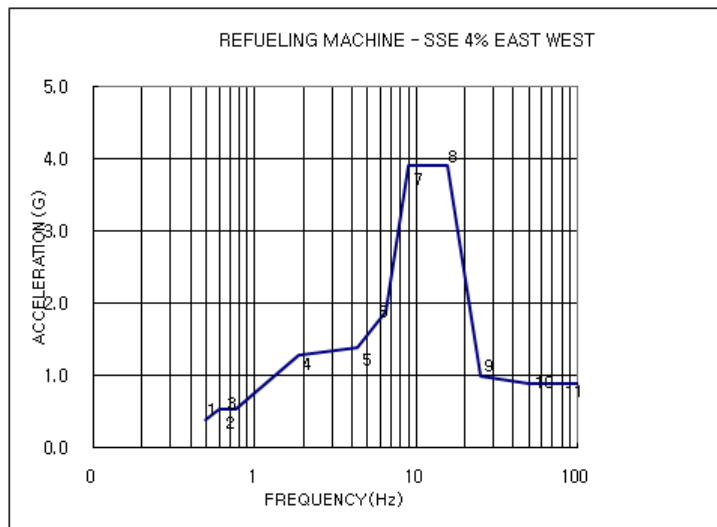


Fig. 27 East-West direction reference response spectra

Table 17 East-West direction reference response spectra

| No. | Reference Response Spectra (Global Y) | |
|-----|---------------------------------------|------------------|
| | Frequency (Hz) | Acceleration (g) |
| 1 | 0.50 | 0.40 |
| 2 | 0.61 | 0.54 |
| 3 | 0.76 | 0.54 |
| 4 | 1.90 | 1.30 |
| 5 | 4.30 | 1.40 |
| 6 | 6.50 | 1.90 |
| 7 | 9.00 | 3.90 |
| 8 | 15.50 | 3.90 |
| 9 | 25.00 | 1.00 |
| 10 | 50.00 | 0.90 |
| 11 | 100.00 | 0.90 |

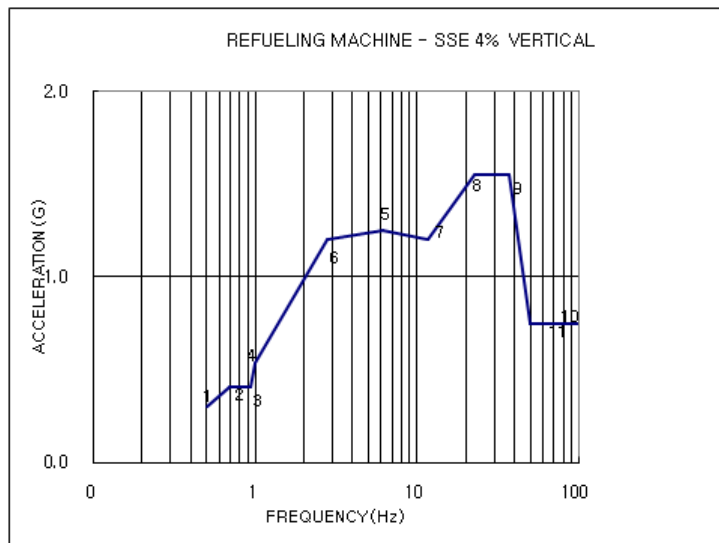


Fig. 28 Vertical direction reference response spectra

Table 18 Vertical direction reference response spectra

| No. | Reference Response Spectra (Global Z) | |
|-----|---------------------------------------|------------------|
| | Frequency (Hz) | Acceleration (g) |
| 1 | 0.50 | 0.30 |
| 2 | 0.70 | 0.41 |
| 3 | 0.94 | 0.41 |
| 4 | 1.00 | 0.54 |
| 5 | 2.80 | 1.20 |
| 6 | 6.20 | 1.25 |
| 7 | 11.80 | 1.20 |
| 8 | 23.00 | 1.55 |
| 9 | 37.00 | 1.55 |
| 10 | 50.00 | 0.75 |
| 11 | 100.00 | 0.75 |

4.4.2 스펙트럼 해석 결과 분석

앞에서 제시한 4%의 감쇠비 응답 스펙트럼을 이용하여 SSE 조건에 대한 응답 스펙트럼 해석을 수행하였다. 계산된 SSE 조건에서의 각 Case에 대한 von Mises 응력 분포를 Fig. 29 ~ 30에 나타내었으며, 최대 응력값은 Table 19에 나타내었다. 또한 각 Case에 대한 변위 분포를 Fig. 31 ~ 32에 나타내었으며, 주요 component에서의 최대 변위값을 Table 20에 정리하였다. 최대 응력값은 Case B가 더 크게 나타났으며, 변위 분포는 Case A의 경우 푸어가 달려있는 마스트에서 나타난 반면, Case B는 푸어가 없으므로 브릿지에서 최대 변위가 나타난 것을 알 수 있다.

Table 19 Maximum stress

(unit : MPa)

| | Case A | Case B |
|--------------------------|--------|--------|
| Maximum von Mises stress | 205 | 210 |

Table 20 Maximum displacement

(unit : mm)

| Node No. | | Displacement | | | Position |
|----------|-------|--------------|-------------|-------------|---------------|
| | | x-direction | y-direction | z-direction | |
| Case A | 50041 | 0.843 | 17.589 | 16.020 | Bridge ass'y |
| | 34485 | 0.832 | 1.957 | 5.589 | Trolley ass'y |
| | 74841 | 43.133 | 2.119 | 31.725 | Mast |
| Case B | 50041 | 1.007 | 17.496 | 15.731 | Bridge ass'y |
| | 34486 | 0.937 | 1.858 | 5.380 | Trolley ass'y |
| | 97063 | 1.510 | 1.169 | 2.092 | Mast |

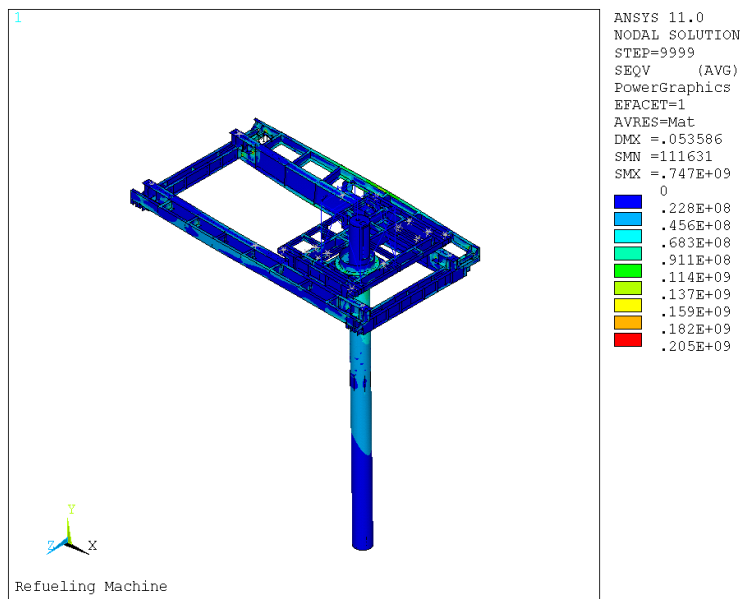


Fig. 29 Distribution of von Mises stress on SSE condition for Case A

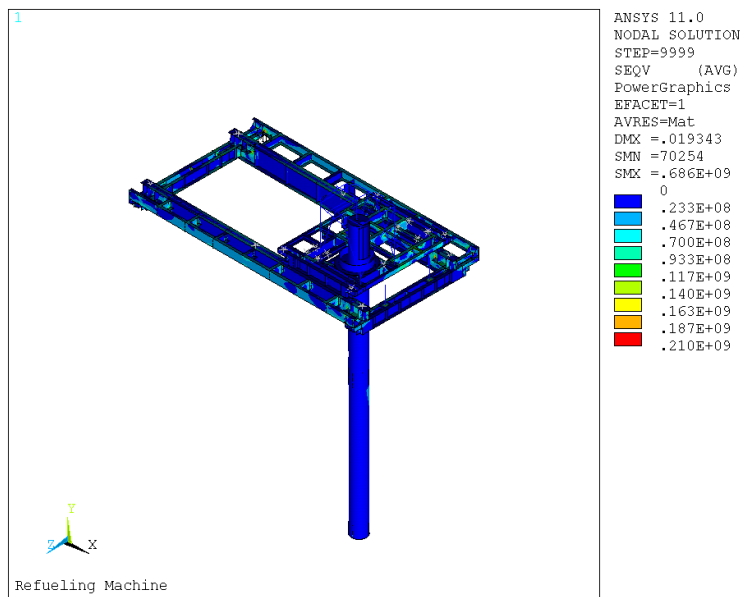


Fig. 30 Distribution of von Mises stress on SSE condition for Case B

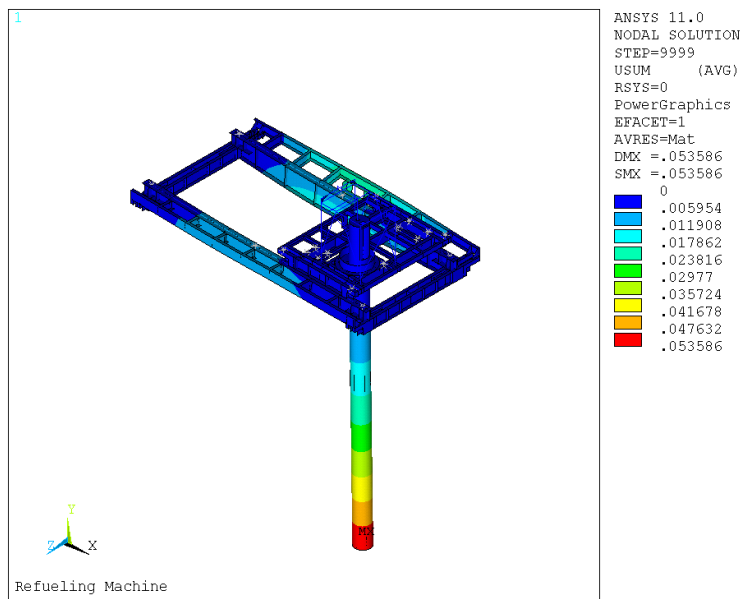


Fig. 31 Distribution of displacement on SSE condition for Case A

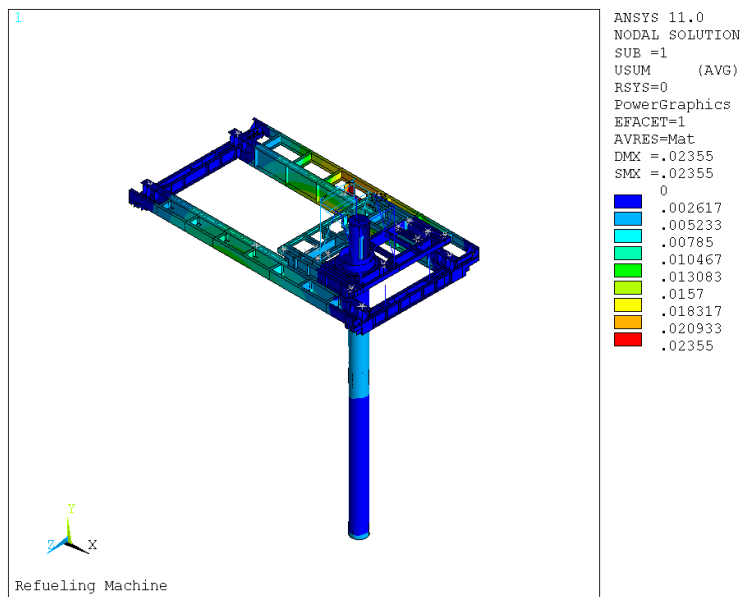


Fig. 32 Distribution of displacement on SSE condition for Case B

5. 볼트부와 용접부에 대한 내진평가

핵연료 재충전 기계의 유한요소 모델은 내진해석을 위해 형상의 단순화 작업을 하였다. 따라서 RM의 유한요소 모델에는 볼트부와 용접부의 모델링이 제외되어 있다. 하지만 볼트부와 용접부는 구조물 및 기계부품의 결합방법으로 구조설계에 고려되어야 할 체결 구조이다.

5.1 허용응력

핵연료 재충전 기계의 이음부 체결을 위해 볼트와 용접을 이용한 방법이 적용되었다. 볼트에 사용된 재질은 JIS규격의 크롬몰리브덴강에 해당하는 SCM435이 사용되었으며, 인장강도는 932MPa이다.

볼트의 허용 인장응력은 운전조건과 SSE 조건에 대하여 다음의 두 가지 중에서 작은 값을 만족하여야 한다.

Operating Condition

$$\sigma_{ab} = 0.33\sigma_t = 0.33 \times 932MPa = 307MPa \quad (5.1)$$

$$\sigma_{ab} = 0.6\sigma_y R - 1.6\tau \quad (R=1.0) \quad (5.2)$$

SSE Condition

$$\sigma_{ab} = 0.5\sigma_t = 0.5 \times 932MPa = 466MPa \quad (5.3)$$

$$\sigma_{ab} = 0.6\sigma_y R - 1.6\tau \quad (R=1.5) \quad (5.4)$$

허용 전단응력은 다음과 같다.

Operating Condition

$$\tau_a = 0.17\sigma_t = 0.17 \times 932MPa = 158MPa \quad (5.1)$$

SSE Condition

$$\tau_a = 0.26\sigma_t = 0.26 \times 932MPa = 242MPa \quad (5.3)$$

용접의 인장강도는 483MPa이며, 운전조건과 SSE 조건에 대하여 다음을 만족하여야 한다.

Operating Condition

$$\sigma_{aw} = 0.3\sigma_t = 0.3 \times 483MPa = 145MPa \quad (5.5)$$

SSE Condition

$$\sigma_{aw} = 0.3\sigma_t \times 1.5(seismic factor) = 0.3 \times 483MPa \times 1.5 = 217MPa \quad (5.6)$$

5.2 볼트부

구조물의 이음을 구성하고 있는 볼트 그룹에는 직접하중과 함께 토크나 모멘트가 작용한다. 이러한 볼트부의 응력해석을 위해 볼트에 작용하는 최대인장응력과 최대전단응력을 고려하여야 한다. Fig. 29는 볼트부의 형상을 보여주고 있다.

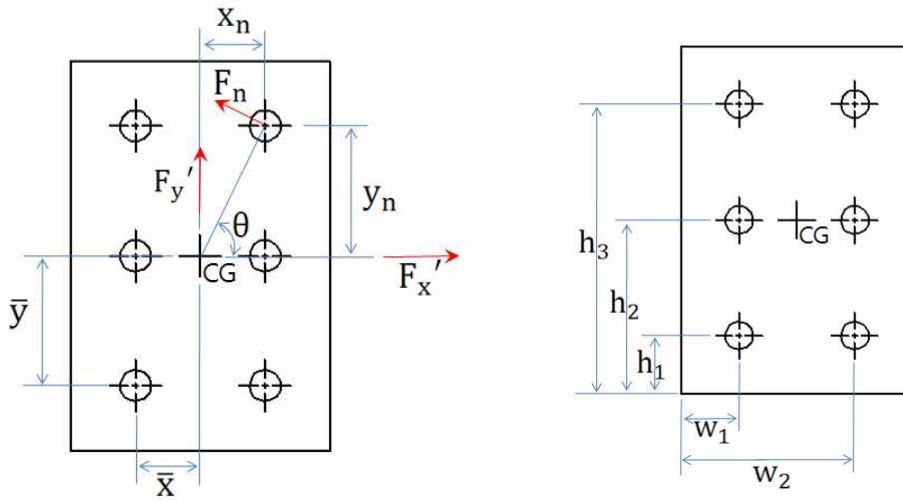


Fig. 33 Bolt position

볼트에 걸리는 최대전단응력을 구하는 해석 절차는 다음과 같다.

1. 조인트 내의 볼트 그룹의 무게중심(CG) 좌표(\bar{x} , \bar{y})를 구한다.

$$\bar{x} = (A_1x_1 + A_2x_2 + \cdots + A_nx_n) / (A_1 + A_2 + \cdots + A_n) \quad (5.1)$$

$$\bar{y} = (A_1y_1 + A_2y_2 + \cdots + A_ny_n) / (A_1 + A_2 + \cdots + A_n) \quad (5.2)$$

2. 작용하중을 볼트수로 나누어 볼트 1개에 작용하는 전단력 F' 을 결정한다.

$$F' = P/N = \frac{\text{CG에 작용하는 힘}}{\text{볼트수}} \quad (5.3)$$

관습상 직접하중 P/N 은 조인트의 모든 볼트에 같은 값을 갖는 것으로 가정한다.

3. 각각이 볼트에 작용하는 모멘트에 의한 반력을 결정한다.

$$M = F_1 r_1 + F_2 r_2 + \cdots + F_n r_n \quad (5.4)$$

그리고

$$F_1 / r_1 = F_2 / r_2 = \cdots = F_n / r_n \quad (5.5)$$

식 (5.4)와 (5.5)를 결합하여 다음과 같은 식을 얻는다.

$$F_n = M r_n / (r_1^2 + r_2^2 + \cdots + r_n^2) \quad (5.6)$$

r_n 은 특정 볼트까지의 거리로 설계시 CG로부터 가장 먼 거리를 택하면 된다.

4. CG로부터 가장 먼 볼트까지의 거리에 대한 x_n , y_n 를 이용하여 θ 값을 구한다.

$$\theta = \tan^{-1} \frac{y_n}{x_n} \quad (5.7)$$

5. 직접하중에 의한 힘과 모멘트에 의한 힘을 벡터적으로 합한 F_r 을 다음과 같이 결정한다.

$$F_r = \sqrt{(F'_x + F_n \sin(\theta))^2 + (F'_y + F_n \cos(\theta))^2} \quad (5.8)$$

6. 합성력 F_r 을 볼트의 단면적으로 나누어 응력계산을 한다.

$$\tau_{\max} = \frac{F_r}{A_n} \quad (5.9)$$

또한, 볼트에 걸리는 최대인장응력을 구하는 해석 절차는 다음과 같다.

1. 작용하중을 볼트수로 나누어 볼트 1개에 작용하는 인장력 T' 을 결정한다.

$$T' = P/N = \frac{\text{수직력}}{\text{볼트수}} \quad (5.10)$$

관습상 직접하중 P/N 은 조인트의 모든 볼트에 같은 값을 갖는 것으로 가정한다.

2. 각각이 볼트에 작용하는 x 방향 모멘트에 의한 반력을 결정한다.

$$M_x = T_1 h_1 + T_2 h_2 + \cdots + T_n h_n \quad (5.11)$$

그리고

$$T_1/h_1 = T_2/h_2 = \cdots = T_n h_n \quad (5.12)$$

식 (5.4)와 (5.5)를 결합하여 다음과 같은 식을 얻는다.

$$T_n = M_x h_n / (h_1^2 + h_2^2 + \cdots + h_n^2) \quad (5.13)$$

h_n 은 특정 볼트까지의 거리로 설계시 플레이트 끝단으로부터 가장 먼 거리를 택하면 된다.

3. 동일한 방법으로 y 방향 모멘트에 의한 반력을 결정한다.

4. 직접하중에 의한 힘과 모멘트에 의한 힘을 합한 F_t 을 다음과 같이 결정한다.

$$F_t = T' + T_x + T_y \quad (5.14)$$

5. 합성력 F_t 를 볼트의 단면적으로 나누어 응력계산을 한다.

$$\sigma_{\max} = \frac{F_t}{A_n} \quad (5.15)$$

이렇게 구해진 볼트에 작용하는 최대전단응력과 최대인장응력 각각에 대하여 허용치를 만족하는지 판단하여, 볼트부의 안정성을 검증한다.

5.2.1 볼트부 해석 예제

볼트부 응력 해석에 대한 실질적인 예제를 통해 그 절차에 대해서 알아보도록 하겠다. 브릿지의 가이드 롤러의 볼트부 응력해석을 수행하였으며, 볼트의 위치는 Fig. 34에 나타내었고 볼트부의 형상을 Fig. 35에 나타내었다. JIS 규격의 SCM435 재질의 지름 24mm 볼트를 사용하였으며, 볼트의 최소 지름인 골지름은 21.752mm 이다.

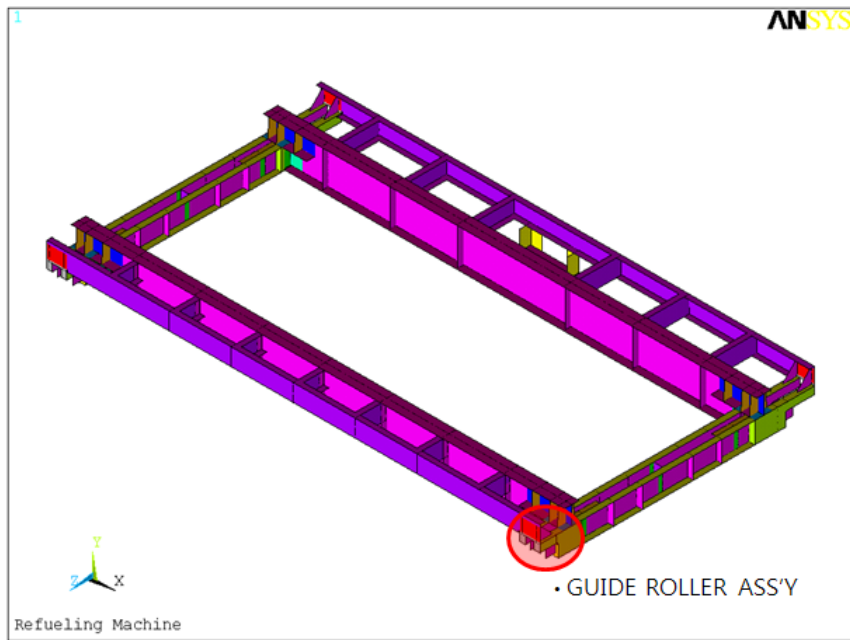


Fig. 34 Bolt joint generating high stress at bridge

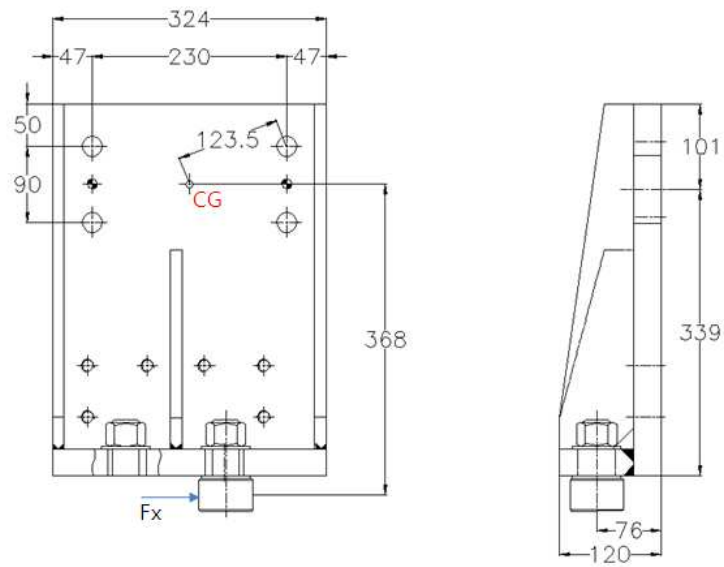


Fig. 35 Bolt joint at guide roller ass'y

JIS SCM435 Bolts

$$D = 0.024m$$

$$d = 0.020752m$$

Bolt section area

$$A = \frac{\pi d^2}{4}$$

$$A = 3.382 \times 10^{-4} m^2$$

Reaction force

$$F_x = 895420N$$

Force at CG

$$P_x = F_x$$

$$P_x = 8.954 \times 10^5 N$$

$$M_y = 0.076 \times F_x$$

$$M_y = 6.805 \times 10^4 Nm$$

$$M_z = 0.368 \times F_x$$

$$M_z = 3.295 \times 10^5 Nm$$

For shear stress

Direct shear stress

$$F'_x = \frac{P_x}{4A}$$

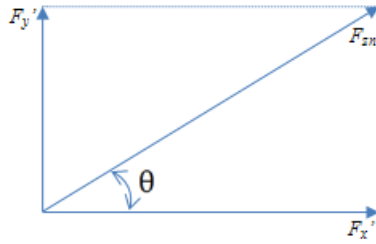
$$F'_x = 6.024 \times 10^8 Pa$$

Shear stress due to torsion

$$F_{zn} = \frac{1}{A} \left(\frac{M_z \times 0.1235}{4 \times 0.1235^2} \right)$$

$$F_{zn} = 1.795 \times 10^9 Pa$$

Resultant shear stress



$$\theta = \text{atan}\left(\frac{115}{45}\right)$$

$$\theta = 68.64^\circ$$

$$F_r = \sqrt{(F_x' + F_{zn} \times \cos(\theta))^2 + (F_{zn} \times \sin(\theta))^2}$$

$$F_r = 2.091 \times 10^9 Pa = 209.1 MPa < \tau_a = 242 MPa$$

For tensile stress

Tensile stress due to torsion

$$T_{zn} = \frac{1}{A} \left(\frac{M_y \times 0.277}{2 \times 0.277^2 + 2 \times 0.047^2} \right) \quad T_{zn} = 3.53 \times 10^8 Pa$$

Resultant tensile stress

$$F_t = T_{zn} = 3.53 \times 10^8 Pa = 353 MPa < \sigma_{ab} = 466 MPa$$

5.3 용접부

구조물의 이음을 구성하는 용접부 또한 볼트부와 마찬가지로 직접하중과 함께 토크나 모멘트가 작용한다. 이러한 용접부의 응력해석이 고려되어야 한다.

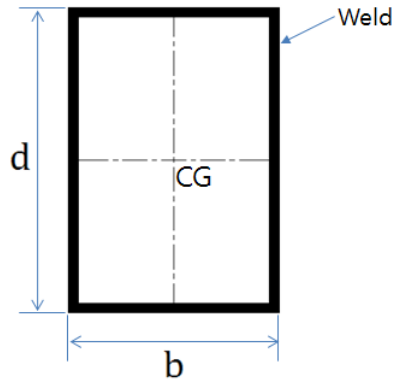


Fig. 36 Weld shape

Fig. 34는 필렛 용접부의 일반적인 형상을 보여주고 있다. 용접부의 응력 해석은 다음과 같은 식을 따른다.

$$f_{wx} = \frac{P_x}{A_w} + \frac{M_y C_z}{J_u} \quad (5.16)$$

$$f_{wz} = \frac{P_z}{A_w} + \frac{M_y C_x}{J_u} \quad (5.17)$$

$$f_{wt} = \frac{P_y}{A_w} + \frac{M_x C_z}{I_x} + \frac{M_z C_x}{I_z} \quad (5.18)$$

여기서 A_w 는 용접부의 길이, I_y , I_z 는 용접부의 단위 관성모멘트, J_u 는 용접부의 단위 극관성모멘트를 각각 나타낸다. 이렇게 구해진 직접하중에 의한 힘과 모멘트에 의한 응력의 합성응력 f_n 은 다음과 같이 결정된다.

$$f_n = \sqrt{(f_{wy})^2 + (f_{wz})^2 + (f_{wt})^2} \quad (5.19)$$

Table 21은 필릿용접의 굽힘특성을 정리하였으며, Table 22는 필릿용접의 비

틀림 특성을 정리하였다.

Table 21 Unit moment of inertia











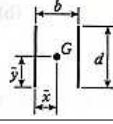
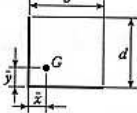
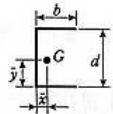
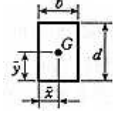

| Weld | Throat area | Position of G | Unit moment of inertia |
|---|------------------------|---|--|
|  | $A_w = 0.707td$ | $\bar{x} = 0$ $\bar{y} = d/2$ | $I_u = d^3/12$ |
|  | $A_w = 1.414td$ | $\bar{x} = b/2$ $\bar{y} = d/2$ | $I_u = d^3/6$ |
|  | $A_w = 1.414td$ | $\bar{x} = b/2$ $\bar{y} = d/2$ | $I_u = bd^2/2$ |
|  | $A_w = 0.707t(2b + d)$ | $\bar{x} = \frac{b^2}{2(b + d)}$ $\bar{y} = d/2$ | $I_u = \frac{d^2}{12}(6b + d)$ |
|  | $A_w = 0.707t(b + 2d)$ | $\bar{x} = b/2$ $\bar{y} = \frac{d^2}{b + 2d}$ | $I_u = 2d^3 - 3 - 2d^2\bar{y} + (b + 2d)\bar{y}^2$ |
|  | $A_w = 1.414t(b + d)$ | $\bar{x} = b/2$ $\bar{y} = d/2$ | $I_u = \frac{d^2}{6}(3b + d)$ |
|  | $A_w = 0.707t(b + 2d)$ | $\bar{x} = b/2$ $\bar{y} = \frac{d^2}{b + 2d}$ | $I_u = 2d^3 - 3 - 2d^2\bar{y} + (b + 2d)\bar{y}^2$ |
|  | $A_w = 1.414t(b + d)$ | $\bar{x} = b/2$ $\bar{y} = d/2$ | $I_u = \frac{d^2}{6}(3b + d)$ |
|  | $A_w = 1.414\pi tr$ | | $I_u = \pi r^3$ |

Table 22 Unit polar moment of inertia

| Weld | Throat area | Position of G | Unit polar moment of inertia |
|--|----------------------|--|--|
|  | $A_w = 0.707td$ | $\bar{x} = 0$ $\bar{y} = d/2$ | $I_u = d^3/12$ |
|  | $A_w = 1.414td$ | $\bar{x} = b/2$ $\bar{y} = d/2$ | $I_u = d^3/6$ |
|  | $A_w = 0.707t(b+d)$ | $\bar{x} = \frac{b^2}{2(b+d)}$ $\bar{y} = \frac{d^2}{2(b+d)}$ | $I_u = bd^2/2$ |
|  | $A_w = 0.707t(2b+d)$ | $\bar{x} = \frac{b^2}{2(b+d)}$ $\bar{y} = d/2$ | $I_u = \frac{d^2}{12}(6b+d)$ |
|  | $A_w = 1.414t(b+d)$ | $\bar{x} = b/2$ $\bar{y} = d/2$ | $I_u = 2d^3 - 3 - 2d^2\bar{y} + (b+2d)\bar{y}^2$ |
|  | $A_w = 1.414\pi tr$ | | $I_u = \frac{d^2}{6}(3b+d)$ |

5.3.1 용접부 해석 예제

용접부 응력 해석에 대한 실질적인 예제를 통해 그 절차에 대해서 알아보도록 하겠다. 트롤리의 호이스트 프레임의 용접부 응력해석을 수행하였으며, 용접부의 형상은 Fig. 34에 나타내었으며, 용접부는 4mm의 필릿용접이 되어있다.

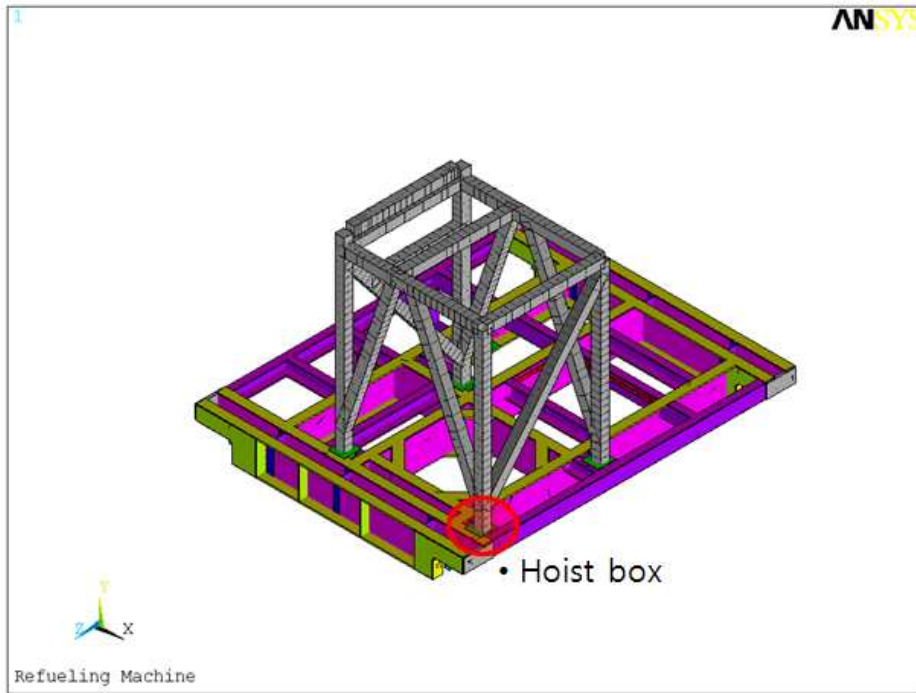


Fig. 37 Weld shape

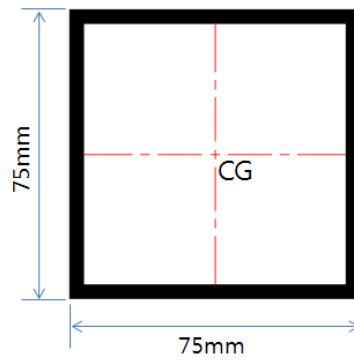


Fig. 38 Weld shape

Weld shape data

$$b = 0.075m \quad d = 0.075m \quad \bar{x} = b/2 = 0.0375m \quad \bar{y} = d/2 = 0.0375m$$

Weld thickness $t = 0.004m$

Throat area $A_w = 1.414t(b + d)$ $A_w = 0.0008484m^2$

$I_x = \frac{d^2}{6}(3b + d)$ $I_x = 0.00028125m^3$

$I_z = \frac{b^2}{6}(3d + b)$ $I_z = 0.00028125m^3$

$J_y = \frac{(b + d)^3}{6}$ $J_y = 0.0005625m^3$

Force at CG

$P_x = 5502N$ $P_y = 32803N$ $P_z = 21234N$

$M_x = 3482Nm$ $M_y = 115Nm$ $M_z = 908Nm$

$f_{wx} = \frac{P_x}{A_w} + \frac{M_y C_z}{J_u}$ $f_{wx} = 6492815Pa = 6MPa$

$f_{wz} = \frac{P_z}{A_w} + \frac{M_y C_x}{J_u}$ $f_{wz} = 25035955Pa = 25MPa$

$f_{wt} = \frac{P_y}{A_w} + \frac{M_x C_z}{I_x} + \frac{M_z C_x}{I_z}$ $f_{wt} = 39249878Pa = 39MPa$

Total stress

$f_n = \sqrt{(f_{wx})^2 + (f_{wz})^2 + (f_{wt})^2}$ $f_n = 46MPa < \sigma_{aw} = 217MPa$

6. 결론

본 논문에서는 원자력 발전소 핵연료 재충전 기계(Refueling Machine)의 설계를 위해 유한요소법을 통해 고정하중과 활하중을 고려한 운전조건과 안전정지진하중을 고려한 SSE 조건에 대한 내진해석을 수행하였다. 고유치 해석을 통하여 재충전 기계의 고유진동수와 진동형상을 파악하고 응답 스펙트럼 해석을 통해 재충전 기계의 내진 안전성을 평가하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 핵연료 재충전 기계의 내진 설계에 관한 절차와 해석 방법을 확립하였으며 원자력발전소 신고리 3/4호기의 핵연료 재충전 기계를 국산화 개발하는데 성공적으로 적용하여 타당성을 입증하였다.
2. 내진해석에 필요한 구조 모델링과 유한요소해석은 상용코드인 ANSYS를 활용하였다.
3. 핵연료 재충전 기계에서 부재와 부재를 연결하는 볼트부와 용접부의 강도 해석 방법을 제시하여 활용하였다.
4. 총 50 모드의 고유치 해석을 수행한 결과, 유효질량이 90% 이상 반영되었으며, 핵연료 재충전 기계의 내진 해석 결과 허용 응력을 만족하는 것을 확인할 수 있다.
5. 해석의 과정과 해설 결과를 이용한 상세설계 과정을 표준화하여 설계프로젝트에 활용할 수 있다.

참고문헌

- [1] 손영호, “한반도 지진 특성을 고려한 국도상 교량의 내진 설계”, 論文集-慶北專門大學, Vol.18 No.1, 2000.
- [2] 윤광섭, “예측불허 하중에 대비한 내진·면진·제진 설계 및 시공”, 면진·제진 설계지침(안) 공청회 참가 보고, 2007.
- [3] 원자력발전소 안전계통 캐비닛의 내진 설계를 위한 동적 해석, 조정래, 계명대학교 기계공학과 석사학위논문, 2005.
- [4] ASME CODE SECT. II PART D, 2004 Edition.
- [5] 내진설계를 위한 구조동력학, 이동근, 조소훈, 한국지진공학회, 구미서관, 2007.
- [6] Korea Electric Power Industry Code (KEPIC) MCN, 2000.
- [7] ANSYS Finite Element Computer Code & Manual.
- [8] DWG : FUEL HANMLING MACHINE, RM-MK-M3.
- [9] Smithells Metal Reference Book, 8th Ed., W.F. GALE & T.C. TOTMEMIER, 2004, ASM.
- [10] 윤정방 외, “구조물의 내진설계”, 제 15회 전산구조공학회 기술강습회, 한국 전산구조공학회, 1997. 1. 20 - 1. 22.